



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALYZÁTOR ULTRAZVUKU

ULTRASOUND ANALYZER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Mička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Kubánek, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Marek Mička

ID: 195785

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analyzátor ultrazvuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou měření a generace ultrazvuku v rozsahu od 20 kHz do 200 kHz. Prostudujte a popište možné zdroje ultrazvuku v přírodě a ve městě. Navrhněte zařízení, které bude umožňovat provádět detekci ultrazvuku alespoň do frekvence 150 kHz konverzí do slyšitelného pásma. Zařízení může pracovat samostatně, případně ve spojení s PC. V experimentální části práce navržené zařízení sestavte a ověřte jeho funkčnost. Maximální detekovatelná frekvence bude respektovat parametry dostupného ultrazvukového měniče.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Švor, Zdeněk: Akustika a elektroakustika, Academia, 2001, ISBN 80-200-0461-0

[2] Doleček, Jaroslav: Moderní učebnice elektroniky - 6. díl - Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat, BEN-Technická literatura, 2009, ISBN 978-80-7300-2

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Bohdan Růžička, Ph.D., MBA

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se týká návrhu zařízení, které je schopné zaznamenat a přehrát ultrazvuk tak, aby byl v rozsahu lidského sluchu. Výsledkem je jednoduché přenosné zařízení, které bude umět nahrávat zvuk až do 80 kHz. Prvním důležitým bodem je výběr dostatečného mikrofonu. Následuje zpracování signálu, jako je zesílení a filtrace. Poslední důležitou částí je heterodynní směšování, které umožní snížit frekvenci nahraného zvuku na slyšitelnou frekvenci. V této práci je navrženo zařízení, které má sloužit tomuto účelu. V následující části práce dojde k jeho realizaci, ověření jeho funkčnosti a otestování. Na trhu sice existují přístroje, které slouží k tomuto účelu, ale velká část jich funguje na jiném principu. Hlavní výhodou tohoto způsobu je jeho jednoduchost.

Klíčová slova

Ultrazvuk, Detektor netopýrů, Heterodynní směšování

Abstract

This thesis is about designing a device which is capable of recording ultrasound and changing its frequency to be listenable by human ear. The created device is simple, portable and capable of recording ultrasound up to 80 kHz. The first important part of this thesis is choosing a proper microphone. It's followed by the processing of the signal. Such processing involves amplifying and filtering. The last part is heterodyning. It allows us to decrease the frequency of recorded signal to make it listenable, which is the purpose of the device designed in this thesis. I will build this device in following bachelor thesis and test its functionality. We can buy devices with similar functionality, but most of are based on different principle. The biggest advantage of this principle is its simplicity.

Keywords

Ultrasound, Bat detector, Hederodyne

Bibliografická citace:

MIČKA, Marek. Analyzátor ultrazvuku [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-26].
Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118121>. Bakalářská
práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce David Kubánek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou (bakalářskou) práci na téma Analyzátor ultrazvuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 27. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Ultrazvuk.....	12
2.1	Šíření ultrazvuku	12
2.2	Využití ultrazvuku.....	12
2.3	Ultrazvuk netopýrů.....	13
3.	Změna frekvence	14
3.1	Zpomalení signálu	14
3.2	Frekvenční dělení	14
3.3	Heterodynní směšování	15
4.	Elektromechanické měniče (mikrofony).....	18
4.1	Magnetostrikční jev.....	18
4.1.1	Magnetostrikční měnič	18
4.2	Piezoelektrický jev	19
4.2.1	Piezoelektrický měnič	19
4.3	Elektrostatický měnič	20
4.4	Elektretový měnič	21
4.5	MEMS mikrofony	21
4.6	Profesionální mikrofon.....	24
5.	Předzesilovač.....	25
6.	Úroveň signálu	27
7.	Frekvenční filtry.....	29
7.1	Vstupní horní propust.....	29
7.2	Výstupní dolní propust	33
8.	Oscilátor	36
9.	Koncový zesilovač	40
10.	Napájení	41
11.	Oživování, ověřování zapojení a měření.....	42
12.	Závěr	55

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

MEMS	...	Mikroelektromechanický systém
PZT	...	Zirkoničitan-titaničitanu olova
A/D	...	Analog/Digital
SPL	...	Sound preassure level, hladina akustického tlaku
SMD	...	součástky pro povrchovou montáž
DPS	...	deska plošných spojů

Symbols:

U	...	napětí	[V]
R	...	odpor	[Ω]
L_s	...	citlivost mikrofonu	[dBV/Pa]
S	...	citlivost mikrofonu	[V/Pa]
A_U	...	zesílení	[-]
L	...	hladina akustického tlaku	[dB _{SPL}]
p	...	akustický tlak	[Pa]
ω_m	...	mezní úhlový kmitočet	[s ⁻¹]
C	...	kapacita	[F]
f	...	frekvence	[Hz]
t	...	čas	[s]

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Signály vysílané netopýry [4]	13
Obrázek 3.1 Vstupní a výstupní signál digitální děličky [5]	15
Obrázek 3.2 Gilbertova buňka	16
Obrázek 3.3 Blokové schéma detektoru ultrazvuku	17
Obrázek 4.1 Princip piezoelektrického měniče [10]	20
Obrázek 4.2 Graf frekvenční charakteristiky ultrazvukového sensoru MA40S4S/MA40S4R [7]	20
Obrázek 4.3 Princip elektrostatického měniče [10]	21
Obrázek 4.4 Princip kapacitního MEMS mikrofону [8]	22
Obrázek 4.5 Frekvenční charakteristika SPM0404UD5 vztažená ke kmitočtu 1 kHz [9]	22
Obrázek 4.6 Frekvenční charakteristika SPU0410LR5H-QB vztažená ke kmitočtu 1 kHz [10]	23
Obrázek 4.7 Frekvenční charakteristika SMM-U1 [11]	24
Obrázek 5.1 Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s operačním zesilovačem [15]	25
Obrázek 5.2 Schéma předzesilovače	26
Obrázek 7.1 Obecné schéma uspořádání filtru [6]	29
Obrázek 7.2 Uspořádání filtru typu horní propust [6]	30
Obrázek 7.3 Frekvenční charakteristika modulu a fáze filtru horní propust	32
Obrázek 7.4 Uspořádání filtru typu dolní propust [6]	33
Obrázek 7.5 Frekvenční charakteristika modulu a fáze filtru dolní propust	35
Obrázek 8.1 Wienův člunek	37
Obrázek 8.2 Frekvenční charakteristika Wienova člunku	37
Obrázek 8.3 Oscilátor s Wienovým člunkem	39
Obrázek 8.4 Průběh napětí na výstupu oscilátoru v závislosti na čase	39
Obrázek 10.1 Převod nesymetrického na symetrické napájení	41
Obrázek 11.1 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu	44

Obrázek 11.2 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu.....	45
Obrázek 11.3 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu.....	46
Obrázek 11.4 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu.....	47
Obrázek 11.5 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu.....	48
Obrázek 11.6 Graf závislosti zesílení předzesilovače na otočení potenciometru.....	50
Obrázek 11.7 Graf závislosti zesílení koncového zesilovače na otočení potenciometru.	51
Obrázek 11.8 Frekvenční charakteristika filtru horní propust.....	52
Obrázek 11.9 Frekvenční charakteristika celého zařízení	54

1. ÚVOD

Ultrazvuk se objevuje kolem nás, ale lidské ucho jej nedokáže slyšet. Cílem této práce je navrhnout a sestavit zařízení, které umožní poslouchat ultrazvuk v reálném čase. Využití takového zařízení může být například při poslouchání a zkoumání ultrazvuku vydávaného netopýry. Dále lze využít i pro lokalizaci různých zdrojů ultrazvukového signálu. Obsahem této práce je jednoduchý rozbor a výběr způsobu změny frekvence do slyšitelného pásma. Dále se zabývám výběrem vhodného mikrofону, který dokáže snímat i frekvence nad běžný rozsah 20 kHz. Následuje návrh jednotlivých částí zařízení jako jsou zesilovače, filtry a oscilátor. V poslední kapitole jsou naměřeny hodnoty jednotlivých částí jako jsou zesílení zesilovače, napěťový přenos filtru a ověření funkčnosti celého zařízení.

2. ULTRAZVUK

Jako ultrazvuk se označuje mechanické vlnění v pásmu mezi 20 kHz a 1 GHz. Toto pásmo leží nad hranicí slyšitelnosti člověka. Vlnění s vyšší frekvencí se někdy označuje jako hyperzvuk. Vlnění s nižší frekvencí (16 Hz až 20 kHz) je zvuk, který je možné slyšet lidským uchem. Kvůli mnoha faktorům (věk, časté vystavování nadměrných hluků a genetické predispozice) se pro většinu lidí udává pásmo 20 Hz až 16 kHz. Vlnění s frekvencí nižší než 16 Hz se nazývá infrazvuk.

2.1 Šíření ultrazvuku

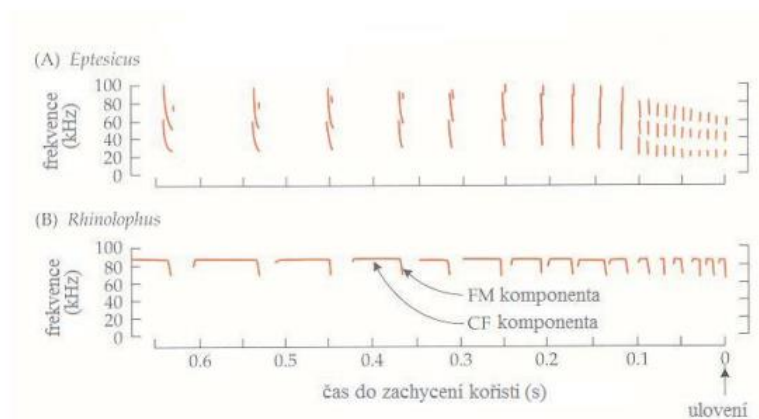
Ultrazvuk se šíří stejně jako ostatní mechanické vlnění. Mechanické vlnění se šíří pouze v pružném prostředí (nikoliv ve vakuu). Ultrazvuk se šíří vzduchem a kapalinami jako podélné vlnění (směr kmitání částic je shodný se směrem šíření vlny). Pevnými látkami se může šířit i jako vlnění příčné (směr kmitání částic je kolmý ke směru šíření vlny). Rychlost šíření závisí na prostředí a dalších faktorech, jako jsou teplota, vlhkost apod. Rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 20 °C je přibližně 340 m/s.

2.2 Využití ultrazvuku

Časté využití ultrazvuku nalezne především v lékařství, kde se ultrazvuk využívá k diagnostice měkkých částí těla. Jeho výhodou jsou malé až nulové negativní účinky na pacienta. Dalším využitím jsou jeho terapeutické účinky, například v odstranění zubního kamene ve stomatologii, nebo hypertermie při léčbě nádorů. Dalším využití ultrazvuku je defektoskopie. Ultrazvuk slouží také k lokalizaci a určování vzdálenosti objektů. Na tomto principu je založený sonar. V přírodě slouží k orientaci delfinům a netopýrům echolokace, která funguje na také na vysílání a přijímání ultrazvuku. Ultrazvuk, který se používá k diagnostice, se nazývá pasivní. Ultrazvuk, který se používá k čištění, vrtání, svařování apod., se nazývá aktivní. Aktivní ultrazvuk mívá mnohem vyšší výkon [1].

2.3 Ultrazvuk netopýrů

Echolokace slouží netopýrům k určování polohy a vyhýbání se překážkám v letu a při lovení potravy. Tuto schopnost má většina netopýrů. Zdrojem ultrazvuku bývají většinou kontrakce hrtanu, v některých případech je to jazyk. Vysílaná frekvence se mění v závislosti na druhu netopýra mezi 20 kHz až 200 kHz. Frekvence signálu se také mění v závislosti na příčině jeho vzniku. Vyšší frekvence slouží k rozpoznávání menších objektů, zatímco nižší frekvence putují dál a slouží k rozpoznání okolí. Aby bylo možné analyzovat přijaté signály, vysílají zvukové impulsy, které trvají řádově desítky milisekund. V rámci těchto impulsů také dochází ke změně frekvence. Dynamický rozsah netopýrů se pohybuje mezi 50 dB a 120 dB. Hladina intenzity 120 dB v slyšitelném pásmu odpovídá hladině bolesti.



Obrázek 2.1 Signály vysílané netopýry [4]

3. ZMĚNA FREKVENCE

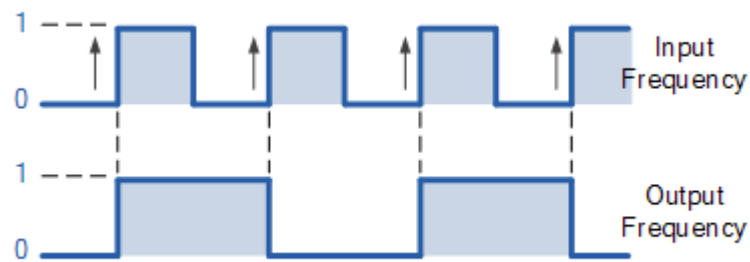
Protože všechny nahrané a zpracované frekvence se nacházejí mimo pásmo lidského slyšení, je možné je zobrazit pouze vizuálně pomocí grafů. Aby bylo možné tyto zvuky přehrát, je nutné změnit jejich frekvenci tak, aby se nacházela v rozsahu ideálně 20 Hz až 16 kHz. Toho lze dosáhnout více způsoby. Níže jsou popsány používané způsoby pro podobný typ zařízení.

3.1 Zpomalení signálu

Tento způsob spočívá na změně frekvence signálu při změně jeho přehrávací rychlosti. Pokud přehrajeme původní zvuk 10krát rychleji, zvýší se jeho frekvenci 10krát. To je způsobeno tím, že při změně rychlosti přehrávání se změní perioda zvuku a tím i frekvence. V našem případě je potřeba snížit frekvenci, tzn. zmenšit rychlost přehrávání. Obecně platí, že kolikrát snížíme rychlost přehrávání, tolikrát se sníží původní frekvence. Pro účely přehrávání netopýřích zvuků můžeme zpomalit nahrávku např. 10krát. Nevýhodou tohoto způsobu je, že nahrávka, které trvala původně 0,1 sekundy, bude trvat nově 1 sekundu. Z toho vyplývá, že se tento způsob nedá používat v reálném čase. Výhodou je to, že se takto lze přehrát celý rozsah zvuků 20 kHz až 150 kHz.

3.2 Frekvenční dělení

Při tomto způsobu změny frekvence se nahraný signál zpracuje tak, že se jeho frekvence vydělí celým konstantním číslem. Často se používá číslo 16. Pokud měl původní signál 80 kHz, pak bude mít nový signál $80/16 = 5$ kHz. Protože analogové děličky frekvence se používají pouze pro vysoké frekvence, používají se k tomuto účelu digitální děličky. Základní děličky používají klopný obvod. Tyto obvody dokážou dělit frekvenci signálu násobky dvou. Nevýhodou tohoto způsobu je odstranění informace o hlasitosti původního signálu. Výhodou je, že takto lze zpracovat a poslouchat jakýkoliv signál, který je dostatečně hlasitý.



Obrázek 3.1 Vstupní a výstupní signál digitální děličky [5]

3.3 Heterodynní směšování

Heterodynní směšování je proces, při kterém dojde ke sčítání a odečítání frekvencí. Heterodynní směšování (superheterodyn) se dnes používá v téměř všech rádiových přijímačích. Pro nás má tento způsob výhodu, protože se jedná o jednoduché a okamžité poslouchání nahrávaného signálu. Nevýhodou je, že se nedá poslouchat celé spektrum, ale musí se přeladovat frekvence oscilátoru. Z výše uvedeného vyplývá, že kromě vstupního signálu je potřebný ještě druhý signál o jiné frekvenci. Násobením těchto signálů dostaneme nové signály. Frekvence těchto signálů je rozdílem a součtem frekvence obou signálů. Pokud násobíme dva signály s průběhem funkce sinus o různé frekvenci, pak platí následující vztah:

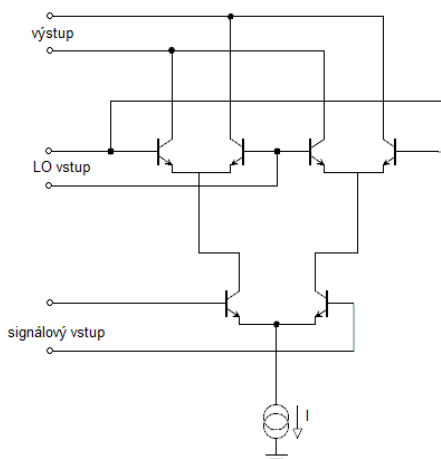
$$\sin x \cdot \sin y = \frac{\cos(x - y)}{2} - \frac{\cos(x + y)}{2} \quad (3.1)$$

Pokud máme signály $u_1 = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$ a $u_2 = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)$, dostaneme výsledný signál.

$$u_1 \cdot u_2 = \frac{\cos [2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2) \cdot t]}{2} - \frac{\cos [2 \cdot \pi \cdot (f_1 + f_2) \cdot t]}{2} \quad (3.2)$$

Z uvedených vztahů vidíme, že pokud máme dvě frekvence, jejich násobením dostane jejich součet a rozdíl. Protože v našem případě chceme snížit frekvenci do slyšitelného pásma, tak nás zajímá převážně první půlka vztahu. Druhá část se nachází v neslyšitelné oblasti. Pokud to je důležité, můžeme je odfiltrovat pomocí filtru dolní propusti. Protože většinou snímaný signál neobsahuje pouze čistý sinusový signál, dochází ke vzniku mnoha kombinačních složek.

K násobení signálů slouží směšovače. Toho lze docílit prakticky na každé nelineární součástce (dioda, tranzistor, elektronka atd.). Směšovače se dají rozdělit na tři základní typy. Asymetrický směšovač propouští kromě nových signálů i oba vstupní signály. Symetrický směšovač potlačuje jeden ze vstupních signálů. Dvojitě symetrický potlačuje oba vstupní signály. Pro naše účely se používá dvojitě symetrický směšovač. Jednoduchý dvojitě vyvážený směšovač je např. Gilbertova buňka.

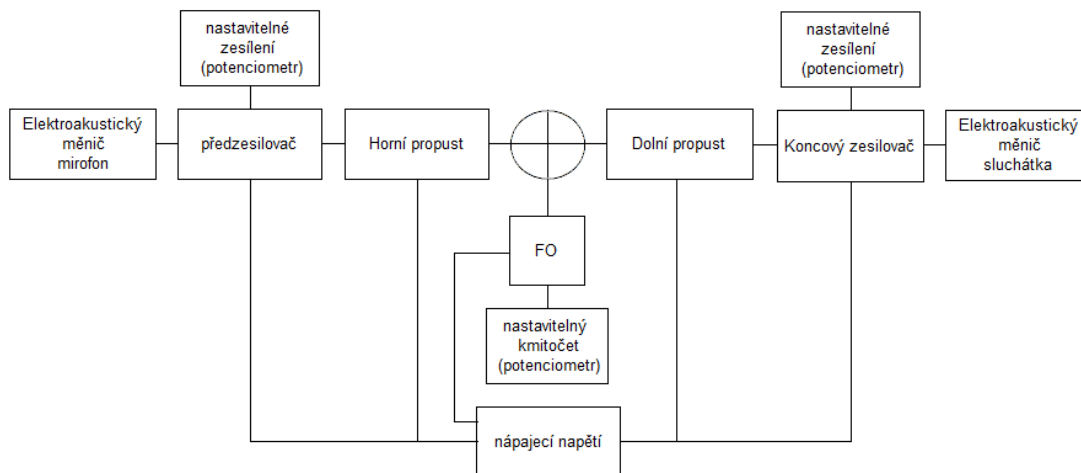


Obrázek 3.2 Gilbertova buňka

Z předešlých způsobů jsem se rozhodl vybrat ten poslední. Celý obvod tedy bude založen na směšovači. Pro naše účely je vhodný například integrovaný obvod SA612AD, který obsahuje mixer a jednotkový zesilovač pro oscilátor. Je to aktivní mixer s napájecím napětím 4,5 až 8 V. Na vstup i výstup lze přivést symetrický i nesymetrický signál. Podmínkou přivedení napětí z frekvenčního oscilátoru je jeho velikost 200 mV_{pp} až 300 mV_{pp}.

Obrázek 3.3 zobrazuje blokové schéma zařízení pracujícího na bázi heterodynního směšování. Toto blokové schéma je totožné i s mnou navrhovaným zařízením.

V následujících kapitolách budu rozebírat jednotlivé bloky tohoto schéma a jak je realizovat. [13] [15]



Obrázek 3.3 Blokové schéma detektoru ultrazvuku

4. ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE (MIKROFONY)

První část jakéhokoliv přístroje, který pracuje se snímáním mechanického vlnění, je mikrofón. Je tedy nutné vybrat vhodný mikrofón, který má dostatečný frekvenční rozsah. Existuje více druhů měničů. Elektromagnetický, magnetodynamický, elektrodynamický, elektrostatický, elektretový, piezoelektrický a magnetostrikční. Tyto měniče jsou více, či méně využívány k výrobě mikrofónů a reproduktorů. Pro generaci ultrazvukového vlnění a jeho příjem jsou primárně používány piezoelektrický a magnetostrikční měnič. Pro účely nahrávání frekvencí v řádech desítek kilohertz se používají elektrostatické a elektretové měniče.

4.1 Magnetostrikční jev

Podstata magnetostrikčního jevu je změna rozměru feromagnetických materiálů. Vnitřní struktura takových materiálů je rozdělena do domén, které jsou magneticky polarizované. Pokud je těleso vloženo do magnetického pole, natočí se domény podle směru vnějšího magnetického pole a posunou se hranice mezi jednotlivými doménami. Důsledkem tohoto je změna rozměrů tělesa. V prvních aplikacích magnetostrikčních měničů se používal nikl. Později se začaly používat sloučeniny jako Terfenol-D, Galfenol, Alfenol ad. Tento jev se využívá u vysílačů ultrazvukových signálů. Opačným jevem je inverzní magnetostrikční jev [14].

4.1.1 Magnetostrikční měnič

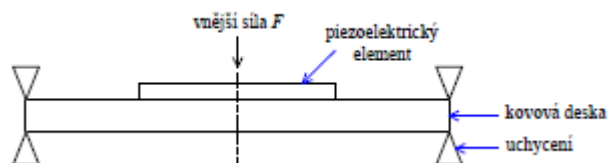
Magnetostrikční měnič se skládá především z tyčinky z magnetostrikčního materiálu, kolem které je navinutá cívka. Tyčinka je přes malé vzduchové mezery připojena k nástavcům permanentního magnetu. Tyto měniče se využívají pouze při nižších frekvencích, řádově desítek kilohertzů [3].

4.2 Piezoelektrický jev

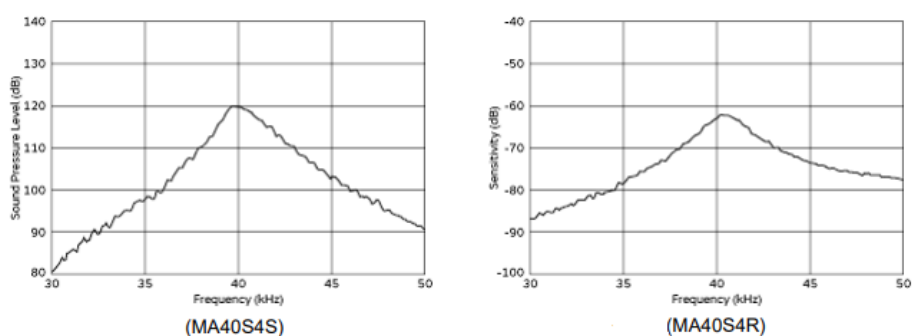
Piezoelektrický jev vzniká u materiálů, které nemají souměrnou krystalovou mřížku. Takové materiály se skládají z iontů, které jsou v běžném stavu uspořádány tak, že je materiál elektricky neutrální. Pokud budeme na tyto materiály aplikovat tlak a stlačíme je, dojde k vychýlení iontů z jejich rovnovážné polohy a vznikne mezi určitými místy elektrický potenciál. Pokud bychom tento materiál naopak roztáhli, došlo by ke vzniku potenciálu opačné velikosti. Po připojení vodičů na správné místo vznikne napětí. Na tomto principu jsou založeny elektroakustické měniče, které fungují jako přijímače ultrazvukového signálu. Elektroakustické měniče, které fungují jako vysílače, využívají nepřímý piezoelektrický jev. Připojením napětí dojde k deformaci piezoelektrického materiálu. Piezoelektrické vlastnosti všech materiálů jsou ovlivněny jejich teplotou. Při překročení určité teploty, tzv. Curieovy teploty, dochází ke ztrátě těchto vlastností. Mezi přirozené piezoelektrické materiály patří např. křemen, turmalín, Seignettova sůl ad. Další skupinou piezoelektrických materiálů jsou polykrytalické piezoelektrické látky, tzv. piezokeramika. K těmto materiálům patří např. BaTiO_3 , PbZrO_3 , PbTiO_3 ad. Nejdůležitějším materiálem je PZT, který se mimo jiné používá v generátorech ultrazvuku. Posledním typem piezoelektrických materiálů jsou organické polymery. Tyto látky jsou používány v mikrofonech [2].

4.2.1 Piezoelektrický měnič

Piezoelektrický měnič se skládá z piezoelektrického materiálu. Na něm jsou uchyceny elektrody. Piezoelektrické měniče mohou pracovat do velice vysokých frekvencí. Problém je, že snímají jenom v úzkém pásmu rezonančního kmitočtu, který je dán rozměrem piezoelektrického materiálu uvnitř měniče. Tyto měniče se používají hodně v defektoskopii, kde pracují ve funkci vysílače i přijímače. Při tomto použití má vysílaný a přijímaný signál konkrétní frekvenci. Obrázek 4.2 zobrazuje frekvenční charakteristiku obyčejného měniče MA40S4S/MA40S4R. Použití tohoto měniče je odlišné od námi hledaného, avšak charakteristika ukazuje, že tento typ není vhodný do tohoto zařízení [3].



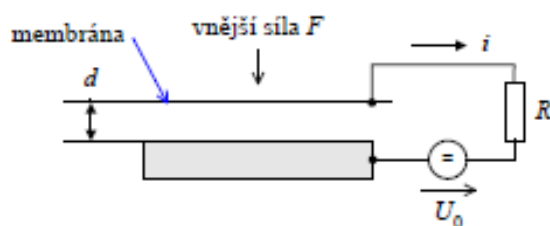
Obrázek 4.1 Princip piezoelektrického měniče [10]



Obrázek 4.2 Graf frekvenční charakteristiky ultrazvukového senzoru MA40S4S/MA40S4R [7]

4.3 Elektrostatický měnič

Na tomto principu pracuje velká část měřicích a nahrávacích mikrofónů. Princip spočívá na změně elektrostatického pole. Obrázek 4.3 zobrazuje princip elektrostatického měniče. Základem je pohyblivá membrána, na které je nanesena tenká kovová vrstva. Při dopadu zvukové vlny na membránu dojde k jejímu vychýlení a ke změně kapacity mezi pohyblivou a nepohyblivou membránou. Nevýhodou tohoto měniče je potřeba externího napájení k přenesení náboje a vytvoření klidové kapacity mezi destičkami. Některé mikrofony mohou snímat i frekvence 100 kHz, ale je potřeba vyšší napájecí napětí [3].



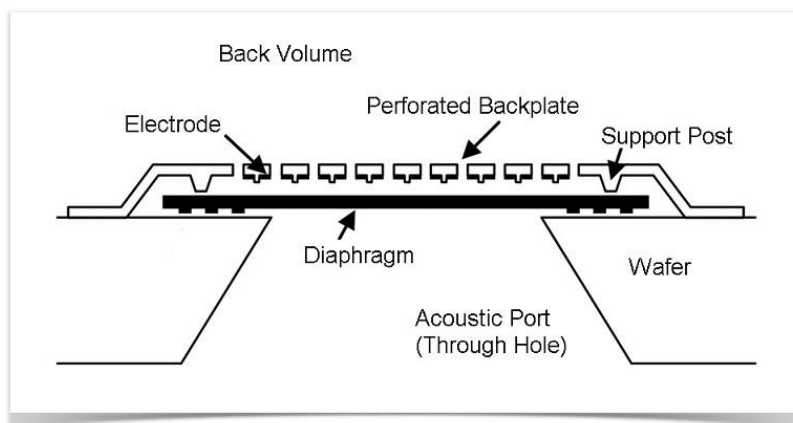
Obrázek 4.3 Princip elektrostatičkého měničč [10]

4.4 Elektretový měnič

Tento měnič funguje na podobném principu jako elektrostatičkový měnič. Rozdílem a výhodou je to, že předpětí není vytvořeno externím zdrojem napětí, ale elektretem (elektricky trvale nabitá látka). Nevýhodou je potřeba zabudovaného předzesilovače, který potřebuje malé napájecí napětí [3].

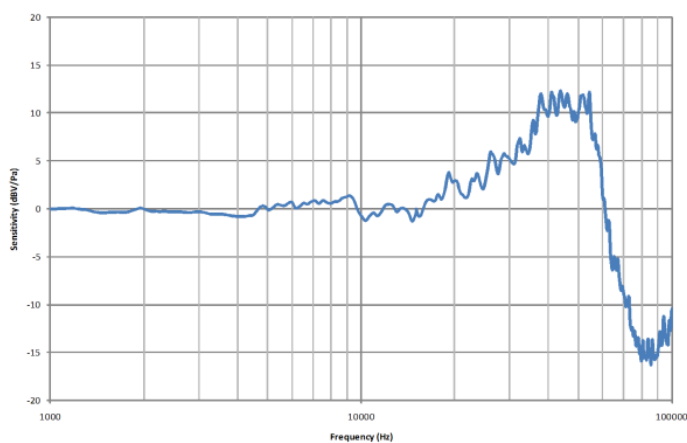
4.5 MEMS mikrofony

Zkratka MEMS znamená mikroelektromechaničkový systém. Je to spojení mečaničkých a elektrických částí. Tyto součástky mohou mít rozměry mikrometrů až jednotek milimetrů. Pro tohle zařízení jsou zajímavé pouze MEMS mikrofony. Ty mohou pracovat na třech způsobech. Prvním z nich, který je nejvíce používaný, je princip změny kapacity, který známe z elektrostatičkových mikrofonů. Zbylé způsoby fungují na piezoelektřickém principu a principu optické detekce. Pro toto zařízení má význam první z uvedených způsobů. Takový mikrofón obsahuje dvě elektrody. Pevná elektroda s malými otvory, které zabraňují vlivu akustického tlaku, a pohyblivá (membrána), která je připevněna pomocí pružin. Malé přivedené napětí vychýlí membránu a slouží k nastavení citlivosti. Na trhu existují MEMS mikrofony, které mají v sobě zabudovaný předzesilovač, nebo např. A/D převodník [16].



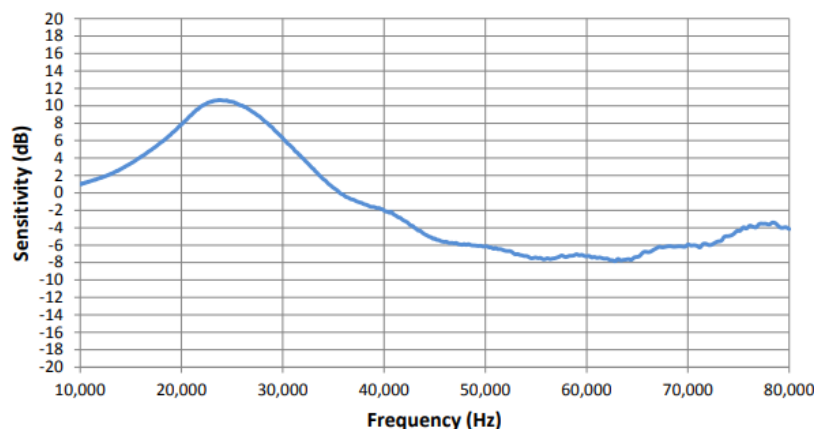
Obrázek 4.4 Princip kapacitního MEMS mikrofону [8]

Vhodný MEMS mikrofon by byl například SMP0404UD5 od firmy Knowles, který se již nevyrábí.



Obrázek 4.5 Frekvenční charakteristika SPM0404UD5 vztažená ke kmitočtu 1 kHz [9]

Mikrofon SPU0410LR5H-QB od firmy Knowles je vhodný mikrofon, který dokáže nahrávat frekvence minimálně do 80 kHz



Obrázek 4.6 Frekvenční charakteristika SPU0410LR5H-QB vztažená ke kmitočtu 1 kHz [10]

V tomto zařízení má největší význam frekvenční charakteristika a schopnost zachytit vlnění o frekvenci ideálně až 150 kHz. Je technologicky složité dosáhnout vyrovnané charakteristiky v celém pásmu a není to primárně důležité. Způsob změny kmitočtu popsany v další části této práce zahrnuje pouze posuv frekvence, nikoliv jeho dělení. To znamená, že při poslechu v reálném čase jsme omezeni reálně 16 kHz. Důležité údaje z katalogového listu jsou napájecí napětí 1,5 až 3,6 V, všesměrová charakteristika, citlivost -38 dBV/Pa a výstupní impedance max. 400 Ω [10] [12].

Citlivost -38 dBV/Pa lze přepočítat na mV/Pa.

$$L_S = 20 \log \frac{S}{S_0} \quad (4.1)$$

L_S je citlivost mikrofonu (dBV/Pa)

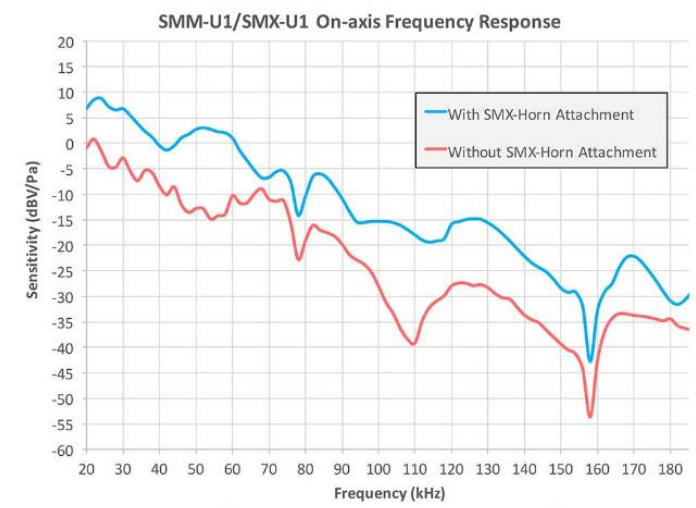
S je citlivost mikrofonu (V/Pa)

S_0 je referenční hodnota, $S_0 = 1$

$$S = 10^{\frac{L_S}{20}} = 10^{-1,9} = 0,01259 \text{ V/Pa} = 12,59 \text{ mV/Pa} \quad (4.2)$$

4.6 Profesionální mikrofon

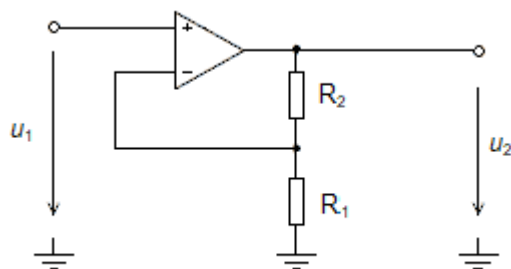
Pro srovnání přikládám frekvenční odezvu profesionálního mikrofonu používaném v detektorech firmy *Wildlife Acoustics*.



Obrázek 4.7 Frekvenční charakteristika SMM-U1 [11]

5. PŘEDZESILOVAČ

Dalším blokem, který můžeme vidět při pohledu na obrázek 3.3, je předzesilovač. Základní funkcí předzesilovače je zesílení signálu za měničem na úroveň, kterou lze snadno zpracovávat v ostatních částech zařízení. Nejdůležitější parametr, který u předzesilovače nastavujeme, je zesílení. Mezi další požadavky patří malé zkreslení a malý šum. V našem zařízení realizujeme zesílení pomocí operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení.



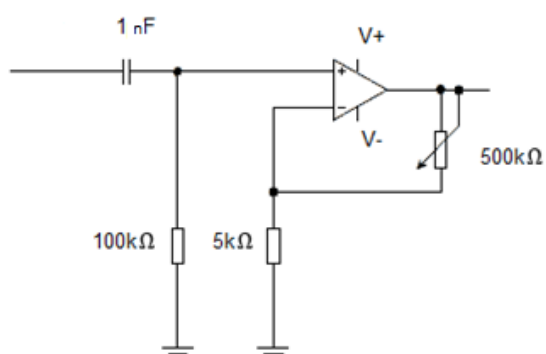
Obrázek 5.1 Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s operačním zesilovačem [15]

$$A_U = \frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5.1)$$

Pokud rezistor R_2 nahradíme potenciometrem, dostaneme zesilovač s nastavitelným zesílením. Vzhledem k jeho účelu je vhodný logaritmický potenciometr.

Hodnoty R_2 a R_1 volíme 500 k Ω a 5 k Ω . Tím dosáhneme zesílení 101. Vhodné je zvolit metalizované odpory, nebo odpory metaloxidové, které jsou určeny na výkonovou ztrátu 0,25 W. Toto platí pro všechny další odpory [6].

Další důležitá část předzesilovače je operační zesilovač. Důležitá vlastnost předzesilovače je nízký šum, proto je vhodné volit nízkošumový operační zesilovač. Protože se jedná o signál minimálně do 100 kHz, je také nutné, aby měl dostatečnou šířku pásma. Vhodný operační zesilovač je například 5532 [6].



Obrázek 5.2 Schéma přezesilovače

Na vstupu zesilovače je vložený kondenzátor a rezistor pro odstranění stejnosměrné složky.

6. ÚROVEŇ SIGNÁLU

Aby toto zařízení správně fungovalo, je potřeba nastavit správnou úroveň signálu ve sluchátkách tak, aby byl signál pro lidské ucho přijatelný. Je tedy nutné se ujistit, že signál není příliš tichý, nebo hlasitý. Spodní hranice slyšení se nazývá práh slyšitelnosti. Jedná se o 0 dB_{SPL}. Horní hranice slyšitelnosti se nazývá práh bolesti. Hodnota prahu bolesti je 130 dB_{SPL}. Ideální úroveň signálu by měla být přibližně od 60 dB_{SPL} do 100 dB_{SPL}.

Pokud známe citlivost mikrofону, můžeme snadno vypočítat napětí z akustického tlaku, který snímáme. V rovnici (4.2) je převedena citlivost mikrofónu z dB/Pa na mV/Pa. Citlivost je 12,59 mV/Pa.

Pokud chceme znát úroveň akustického tlaku vytvořeného sluchátky, potřebujeme znát jejich citlivost a impedanci. Citlivost je udávána v dB_{SPL}/mW a udává, kolik dB_{SPL} vybudí sluchátka po přivedení výkonu 1 mW. Typická hodnota obyčejných sluchátek je kolem 95 dB_{SPL}/mW. Typická impedance obyčejných sluchátek bývá 16, nebo 32 Ω.

Nejdřív určíme maximální hodnotu akustického tlaku, který určí maximální hlasitost. Pokud uvažujeme s jednotkovým zesílením obou zesilovačů, jediným zesílením zůstává aktivní směšovač, kterému je věnována předchozí kapitola. Zesílení směšovače je 17 dB.

Pokud máme sluchátka s citlivostí 95 dB_{SPL} a impedancí 32 Ω, je potřeba 3,16 mW, aby vznikl akustický tlak 100 dB_{SPL}, který jsem si určil jako maximální hodnotu. Z impedance a výkonu lze vypočítat potřebné napětí.

$$U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{3,16 \cdot 10^{-3} \cdot 32} = 0,32 V_{RMS} \quad (6.1)$$

Protože $0,32 \text{ V}_{\text{RMS}}$ je efektivní hodnota, je amplituda signálu větší. Činitel výkyvu odhaduji na 6 dB. Pokud je úroveň signálu ve sluchátkách 0,64 V a jediné zesílení 17 dB poskytuje směšovač, je úroveň signálu za mikrofonom:

$$U_{mic} = \frac{0,64}{7,1} = 0,09 \text{ V} = 90 \text{ mV} \quad (6.2)$$

V technickém listu zesilovače není řečeno, jaká je vhodná velikost vstupního napětí, zmíněna je pouze velikost vstupního napětí oscilátoru. Proto usuzuji, že na velikosti vstupního napětí téměř nezáleží. Z citlivosti mikrofону víme, že 90 mV vyvolá akustický tlak 111 dB_{SPL}. Maximální akustický tlak, který je schopný mikrofón zachytit, je 118 dB_{SPL}, z čehož plyne, že lze využít většinu rozsahu mikrofónu.

Dále je potřeba určit minimální hodnotu akustického tlaku, který určí minimální hlasitost. V tomto případě je potřeba uvažovat s maximálním zesílením obou zesilovačů i zesílením směšovače. Do stejných sluchátek je potřeba dodat 0,316 μW, aby vybudila akustický tlak 60 dB_{SPL}.

$$U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{3,16 \cdot 10^{-7} \cdot 32} = 3,2 \text{ mV}_{\text{RMS}} \quad (6.3)$$

Opět je potřeba převést efektivní hodnotu. V tomto případě je potřeba kromě zesílení směšovače ještě zvažovat zesílení obou zesilovačů. V předchozí kapitole jsem navrhl předzesilovač se zesílením 101. V další kapitole bude popsán zesilovač se zesílením 11.

$$U_{mic} = \frac{0,0064}{7,1 \cdot 11 \cdot 101} = 8,11 \cdot 10^{-7} \text{ V} \quad (6.4)$$

Z citlivosti mikrofónu víme, že $8,11 \cdot 10^{-7} \text{ V}$ vyvolá 10 dB_{SPL} na vstupu mikrofónu.

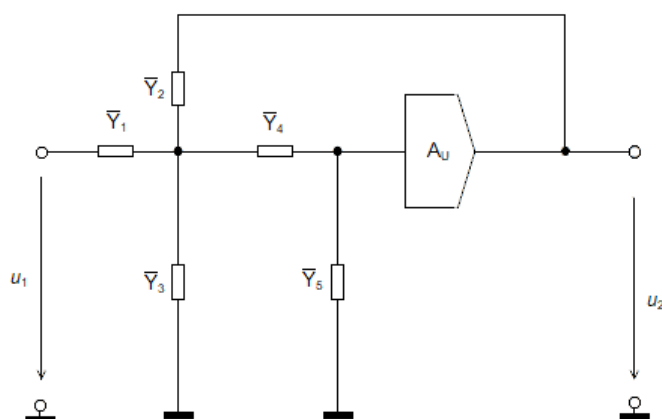
Podle hodnot vypočítaných v téhle kapitole je zesílení dostatečné. Vzhledem k účelu zařízení nepředpokládám, že by byl signál snímán z malé vzdálenosti. Protože hodnota akustického tlaku klesá se vzdáleností, tak vzhledem k použití není potřeba přidávat útlumový člen k zeslabení signálu.

7. FREKVENČNÍ FILTRY

Další část přístroje je frekvenční filtr. Základním účelem frekvenčních filtrů je potlačit, nebo zesílit určité kmitočtové pásmo. Základní dělení filtrů je: dolní propust, pásmová propust, pásmová zadrž a horní propust. Z hlediska konstrukce můžeme rozdělit filtry na pasivní, které mají na výstupu menší úroveň signálu, a aktivní, které mají na výstupu stejnou nebo vyšší úroveň signálu. Pasivní prvky se skládají pouze z pasivních součástek (rezistor, kondenzátor, cívka), V aktivních je navíc aktivní prvek – operační zesilovač. V našem zařízení budou obsaženy 2 filtry. Filtr typu horní propust za předzesilovačem, který eliminuje složky pod 20 kHz, a filtr typu dolní propust za směšovačem, který eliminuje složky nad 20 kHz.

7.1 Vstupní horní propust

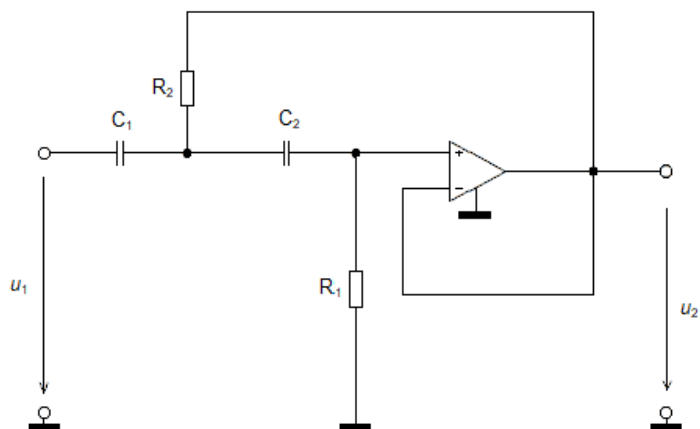
Tento filtr je použit proto, abychom zpracovávali pouze signál nad 20 kHz a odfiltrovali nahrané slyšitelné zvuky. To je důležité proto, aby nedošlo ke vzniku nechtěných kombinačních složek ve směšovači. K tomuto účelu je realizován aktivní filtr typu horní propust druhého řádu s přenosovou funkcí podle Butterwortha, která nabízí rychlý pokles v nepropustném pásmu a vyrovnanou modulovou charakteristiku v propustném pásmu. Protože se jedná o filtr druhého řádu, má modulová charakteristika pokles 40 dB/dek. Zvolený mezní kmitočet filtru je 10 kHz.



Obrázek 7.1 Obecné schéma uspořádání filtru [6]

Přenosová funkce takového filtru potom je:

$$K(\bar{s}) = A_U \frac{\bar{Y}_1 \bar{Y}_4}{\bar{Y}_4 [\bar{Y}_1 + (1 - A_U) \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3] + \bar{Y}_5 (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4)} \quad (7.1)$$



Obrázek 7.2 Uspořádání filtru typu horní propust [6]

Porovnáním předchozích dvou obrázků (obrázek 7.1 a obrázek 7.2) můžeme získat tyto vztahy.

$$\bar{Y}_1 = \omega_m \bar{s} C_1$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{1}{R_2}$$

$$\bar{Y}_3 = 0$$

$$\bar{Y}_4 = \omega_m \bar{s} C_2$$

$$\bar{Y}_5 = \frac{1}{R_1}$$

Dosazením do rovnice (7.1) a upravením dostaneme přenosovou rovnici filtru typu horní propust, viz obrázek 7.2.

$$K(\bar{s}) = \frac{\omega_m^2 \bar{s}^2 C_1 C_2}{\omega_m^2 \bar{s}^2 C_1 C_2 + \frac{1}{R_1} \left(\omega_m \bar{s} C_1 + \frac{1}{R_2} + \omega_m \bar{s} C_2 \right)} \quad (7.2)$$

Rovnici (7.2) je potřeba upravit do tvaru obecné rovnice filtru typu horní propust druhého řádu.

$$K(\bar{s}) = \frac{A_U}{1 + a_1 \frac{1}{\bar{s}} + b_1 \frac{1}{\bar{s}^2}} \quad (7.3)$$

Pokud zvolíme přenos $A_U = 1$, a $C_1 = C_2 = C$, potom vypadá upravená rovnice (7.2) do tvaru rovnice (7.3) následovně.

$$(\bar{s}) = \frac{1}{1 + \frac{2}{R_1 \omega_m C} \frac{1}{\bar{s}} + \frac{1}{\omega_m^2 R_1 R_2 C^2} \frac{1}{\bar{s}^2}} \quad (7.4)$$

Pokud je zvolena aproximace podle Butterwortha, pak platí následující vztahy pro kořeny a_1 a b_1 .

$$a_1 = 1,4142$$

$$b_1 = 1$$

Dále je potřeba zvolit hodnotu kondenzátoru C . Zvolíme $C = 1 \text{ nV}$. Potom vypočítáme hodnotu R_1 a R_2 .

$$R_1 = \frac{2}{1,4142 \cdot 2\pi f_m \cdot 10^{-9}} = 22\,508 \, \Omega$$

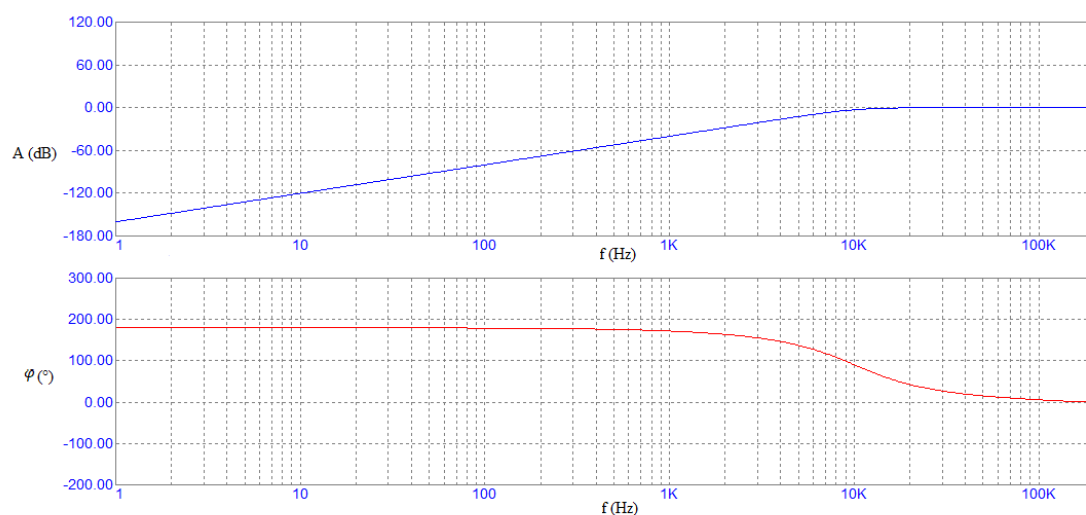
Zvolil jsem rezistor 22,6 k Ω z řady E24.

$$R_2 = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_m^2 \cdot 22600 \cdot 10^{-18}} = 11\,208 \, \Omega$$

Zvolil jsem rezistor $11\text{ k}\Omega$ z řady E24.

Jako operační zesilovač může sloužit druhý operační zesilovač z pouzdra NE5532, který byl použit pro předzesilovač [6].

Na následující obrázek přikládám frekvenční charakteristiku modulu a fáze navrhnutého kmitočtového filtru v programu *Micro-Cap*.

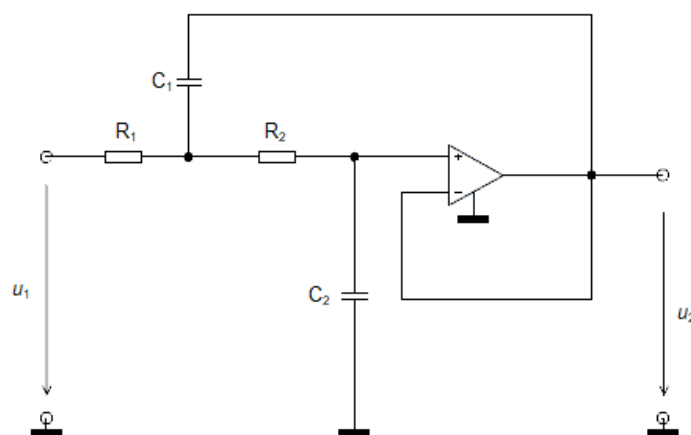


Obrázek 7.3 Frekvenční charakteristika modulu a fáze filtru horní propust

7.2 Výstupní dolní propust

Tento filtr používáme proto, abychom odfiltrovali nežádoucí složky nad 20 kHz, které vzniknou na výstupu směřovače. Tyto složky sice neslyšíme, ale protože nejsou užitečné, je vhodné je odfiltrovat. K tomuto účelu realizujeme aktivní filtr typu horní propust druhého řádu s přenosovou funkcí podle Butterwortha, která nabízí rychlý pokles v nepropustném pásmu a vyrovnanou modulovou charakteristiku v propustném pásmu. Protože se jedná o filtr druhého řádu, má modulová charakteristika pokles 40 dB/dek. Zvolil jsem mezní kmitočet filtru 25 kHz.

Obecné uspořádání filtru zobrazuje obrázek 7.1 a obecná přenosová rovnice odpovídá rovnici (7.1). Protože se nyní jedná o filtr typu dolní propust, změní se uspořádání součástek. Obrázek 7.4 ukazuje uspořádání součástek typu dolní propust.



Obrázek 7.4 Uspořádání filtru typu dolní propust [6]

Pro tento filtr platí následující vztahy:

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{R_1}$$

$$\bar{Y}_2 = \omega_m \bar{s} C_1$$

$$\bar{Y}_3 = 0$$

$$\bar{Y}_4 = \frac{1}{R_2}$$

$$\bar{Y}_5 = \omega_m \bar{s} C_2$$

Dosazením do rovnice (7.1) a upravením dostaneme přenosovou rovnici filtru typu horní propust.

$$K(\bar{s}) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2}}{\frac{1}{R_1 R_2} + \omega_m \bar{s} C_2 \left(\frac{1}{R_1} + \omega_m \bar{s} C_1 + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (7.5)$$

Rovnici (7.5) je potřeba upravit do tvaru obecné rovnice filtru typu horní propust druhého řádu.

$$K(\bar{s}) = \frac{A_U}{1 + a_1 \frac{1}{\bar{s}} + b_1 \frac{1}{\bar{s}^2}} \quad (7.6)$$

Pro $A_U = 1$ platí:

$$K(\bar{s}) = \frac{1}{1 + (R_1 + R_2) \omega_m C_2 \bar{s} + \omega_m^2 R_1 R_2 C_1 C_2 \bar{s}^2} \quad (7.7)$$

Opět je potřeba vyjádřit R_1 a R_2 . V tomto případě přibude podmínka:

$$\frac{C_1}{C_2} \geq \frac{4b_1}{a_1^2} \quad (7.8)$$

Zvolená aproximace je opět podle Butterwortha, koeficienty jsou tedy stejné.

$$a_1 = 1,4142$$

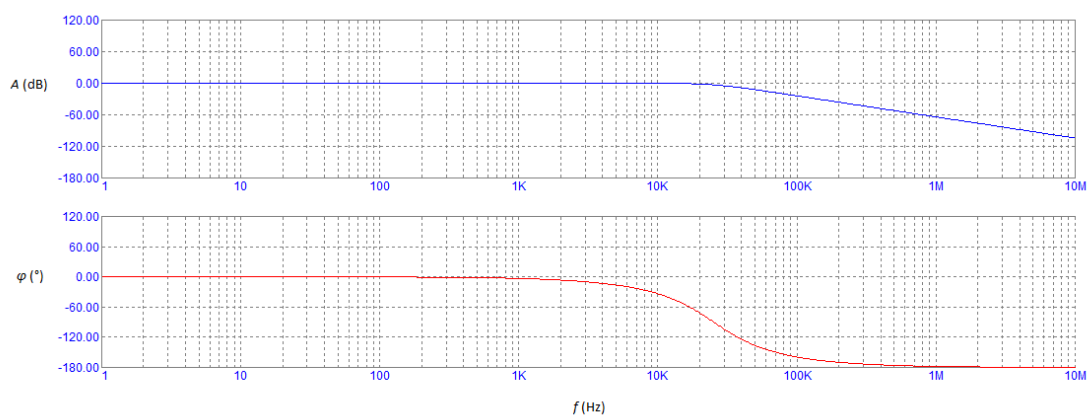
$$b_1 = 1$$

Volím hodnoty kondenzátorů $C_1 = 2,15$ nF a $C_2 = 1$ nF.

Hodnoty rezistorů potom budou $R_1 = 3,32$ kΩ a $R_2 = 5,63$ kΩ. Obojí alespoň z řady E24.

Poslední volenou součástí je operační zesilovač. Použijí stejný operační zesilovač jako v předešlých částech [6].

Na následujícím obrázku příkládám frekvenční charakteristiku modulu a fáze navrhnutého kmitočtového filtru v programu *Micro-Cap*.



Obrázek 7.5 Frekvenční charakteristika modulu a fáze filtru dolní propust

8. OSCILÁTOR

Další důležitou částí obvodu je elektromagnetický oscilátor. Při heterodynním směřování se násobí dva signály a vznikají signály nové s rozdílem a součtem frekvencí původního signálu. Jako první signál slouží nahraný ultrazvuk pomocí mikrofónu. Druhý signál je ideálně harmonický signál, který bude dodávat do směšovače právě tento oscilátor. Pro tento účel je potřeba, aby měl jednoduše nastavitelnou frekvenci.

Za elektromagnetický oscilátor se považuje takový obvod, který má na výstupu střídavé napětí bez přivedení takového napětí na vstup. Existuje více druhů oscilátorů. Možné dělení je podle tvaru výstupního signálu. Další možné dělení je například na LC a RC oscilátory. Jejich základní princip je totožný. Tyto obvody mají dvě části. Zesilovač a zpětnovazební člen. $\hat{A}_U(\omega)$ je zesílení přímé větve a $\hat{K}_U(\omega)$ zpětnovazební větve.

$$\hat{A}_U(\omega) = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} \quad (8.1)$$

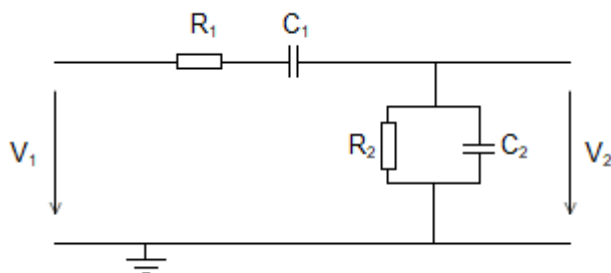
$$\hat{K}_U(\omega) = \frac{\hat{U}_3}{\hat{U}_2} \quad (8.2)$$

Aby vznikly na výstupu kmity o konstantní amplitudě, musí platit 2 následující podmínky:

$$A_U(\omega) \cdot K_U(\omega) = 1 \quad (8.3) [6]$$

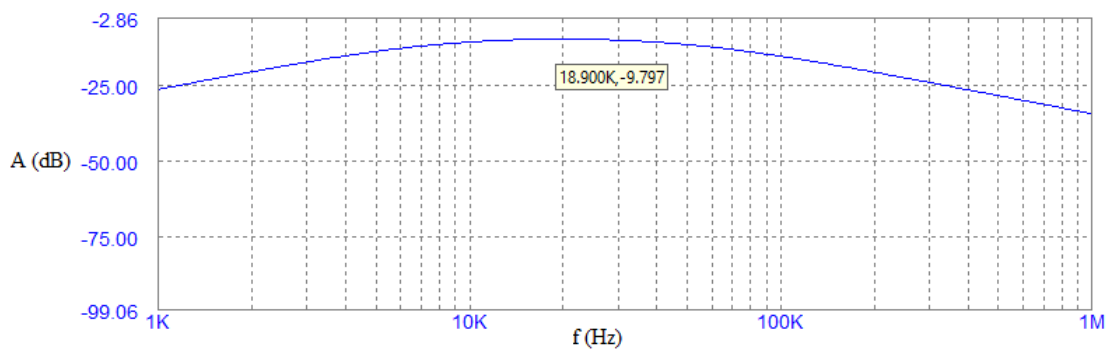
$$\varphi_A(\omega_1)\varphi_K(\omega_1) = n2\pi, \quad (n = 0, \pm 1, \dots) \quad (8.4)$$

Mezi základní obvody patří oscilátor s Wienovým článkem. Výhodou tohoto obvodu je jeho snadno nastavitelný kmitočet. V tomto případě je potřeba, aby měl oscilátor kmitočet přibližně v rozsahu 19 kHz až 150 kHz.



Obrázek 8.1 Wienův článek

Wienův článek funguje jako pásmová propust. Na rezonančním kmitočtu se odpor rovná reaktanci a amplituda výstupního napětí se rovná jedné třetině vstupního napětí.



Obrázek 8.2 Frekvenční charakteristika Wienova článku

Obrázek 8.2 zobrazuje frekvenční charakteristiku Wienova článku nasimulovanou v programu *Micro-Cap*. Aby platila rovnice (8.3), musí být zesílení zesilovače rovno třem. Jako zesilovač nám slouží operační zesilovač v neinvertujícím zapojení, který můžeme vidět (obrázek 5.1). Pro takový zesilovač platí vztah (5.1). Aby se oscilátor rozkmital, je potřeba, aby bylo počáteční zesílení větší než tři. Takový oscilátor by ovšem nekmital ustáleně. Aby byla amplituda výstupního signálu stejná, musí se

přidat dvě paralelně řazené diody D_1 a D_2 do zpětné vazby zesilovače, aby ustálily zesílení. Tyto diody vnášejí do obvodu zkreslení. Protože má ale nejnižší kmitočet 19 kHz, má první vyšší harmonická frekvence 38 kHz. Takový rozdíl dvou frekvencí není vzhledem k rozsahu lidského sluchu slyšet.

Druhá část oscilátoru nastavuje výstupní frekvenci. Pokud platí, že $R_1 = R_2$ a $C_1 = C_2$, pak ji můžeme vypočítat pomocí následujícího vztahu.

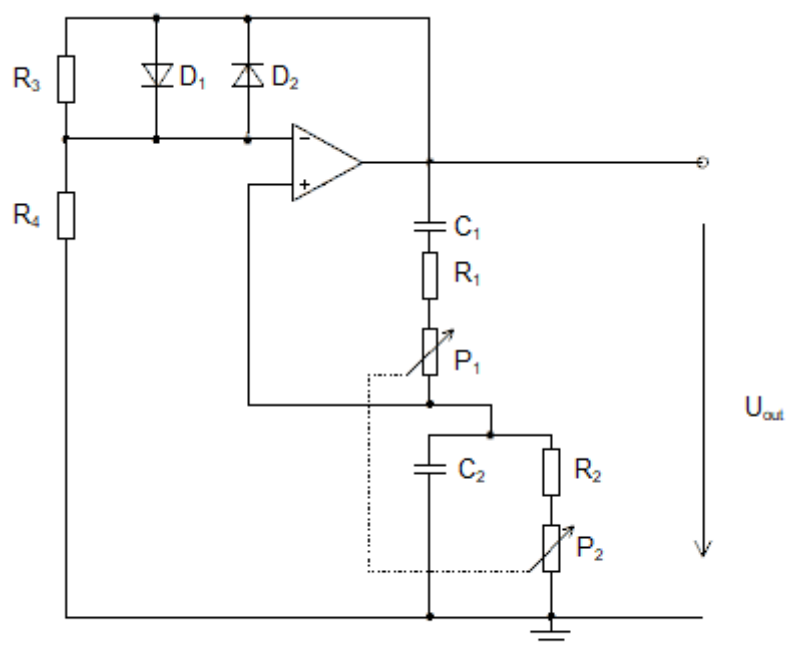
$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8.5)$$

Zvolím si hodnotu kondenzátoru $C = 1 \text{ nF}$ a dopočítám minimální a maximální hodnotu rezistoru, který určí maximální a minimální frekvenci.

$$R_{f_{\min}} = \frac{1}{2\pi C f_{\min}} = 8376 \text{ } \Omega$$

$$R_{f_{\max}} = \frac{1}{2\pi C f_{\max}} = 1061 \text{ } \Omega$$

Vhodné je použít např. rezistor $R = 1000 \text{ } \Omega$ a sériově připojené potenciometry $P_1 = P_2 = 10 \text{ k}\Omega$, které budou sloužit k nastavení frekvence.

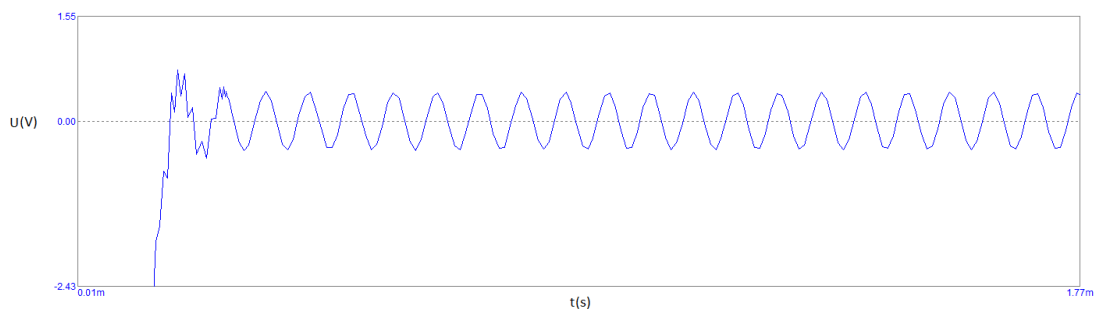


Obrázek 8.3 Oscilátor s Wienovým článkem

Protože úroveň napětí oscilátoru na vstup směšovače je stanovena výrobcem, vloží se na výstup oscilátoru napěťový dělič.

Zvolený operační zesilovač je opět NE5532. Diody je možné použít například 1N4148.

Obrázek 8.4 zobrazuje nasimulovaný průběh napětí v programu Micro-Cap. [17]



Obrázek 8.4 Průběh napětí na výstupu oscilátoru v závislosti na čase

9. KONCOVÝ ZESILOVAČ

Abychom mohli poslouchat výsledný zvuk, je potřeba použít další elektroakustický měnič. Na to stačí obyčejná sluchátka s impedancí 16, nebo 32 ohmů. Další důležitý parametr je citlivost. Ta se pohybuje od 80 do 120 dB/mW a určuje, kolik dB_{SPL} vyvolá 1 mW. Z těchto údajů lze říct, že napěťové zesílení nemusí být velké. Důležité je dodat dostatečný proud do zátěže.

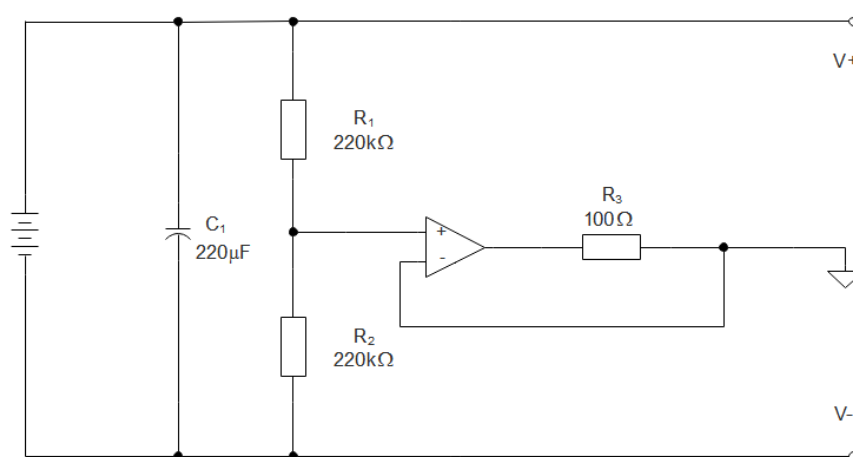
Jako zesilovač lze použít stejné zapojení, jako ukazuje obrázek 5.2. Hodnota potenciometru je 10 k Ω a hodnota rezistoru 1 k Ω .

Jako operační zesilovač lze opět použít operační zesilovač z pouzdra NE5532.

10. NAPÁJENÍ

Z účelu zařízení vyplývá, že by mělo být přenosné, a proto je nutné zvolit bateriové napájení. Pokud je zdrojem napětí baterie, je obvodu dodáváno nesymetrické napětí. Pro operační zesilovače je vhodnější symetrické napětí a pro výše popsany oscilátor je dokonce nutností. Je více způsobů pro změnu napětí z nesymetrického na symetrické. Obrázek 10.1 ukazuje jednoduchý způsob převedení nesymetrického napájení na symetrické. Pro posílení výstupu je přidán operační zesilovač. Použit lze opět NE5532.

Aby bylo do obvodu dodáváno dostatečné napětí, je potřeba dodat napětí 12 V.



Obrázek 10.1 Převod nesymetrického na symetrické napájení

11. OŽIVOVÁNÍ, OVĚŘOVÁNÍ ZAPOJENÍ A MĚŘENÍ

Před samotným sestrojením ověřením přístroje je potřeba navrhnout a vyrobit desku plošných spojů a umístit na ni jednotlivé součástky. K návrhu desky plošných spojů slouží například program *EAGLE*. Základní krokem je vytvoření zemnicí plochy. Jejím vytvořením odpadá potřeba propojovat vývody součástek, které jsou propojeny se zemí. To usnadní návrh desky. Dalším krokem je vybrání pouzder jednotlivých součástek. Používají se dva typy pouzder – SMD a tzv. through hole. Každé z nich má výhody. Nevýhodou through hole součástek je, že je potřeba vyvrtat otvory v desce. Výhodou je snadnější práce při testování. Výhoda SMD součástek je jejich malá velikost tudíž i menší velikost desky. V tomto případě jsou součástky typu SMD. Jedinou výjimkou je elektrolytický kondenzátor. Při návrhu je potřeba dodržovat zásady osazování DPS. Proto jsou blokovací kondenzátory umístěny co nejbliž pinů pro napájení integrovaných obvodů. Součástky na vstupu operačních zesilovačů jsou taky umístěny co nejbliž jejich pinů. Další částí DPS jsou tzv. via. Ty slouží k průchodu signálu z horní strany desky na spodní. Účelem via na téhle desce je propojení zemnicí plochy, protože z důvodů izolace nejsou propojeny všechny části zemnicí plochy na horní straně desky. Posledním krokem je vybrání správných součástek a stažení, nebo vytvoření jednotlivých pouzder, které se zobrazují na výsledné desce v programu *EAGLE*. Obrázek navrhnuté desky obsahuje příloha 2 - Obrázek desky navrhnuté v programu Eagle.

Prvním krokem při oživování obvodu bylo ověření, že nedochází k žádnému zkratu. Poté se začaly ověřovat jednotlivé části obvodu.

Prvním krokem bylo ověření napájecího napětí. Po zjištění funkčnosti byly přidány dva kondenzátory $C = 1 \text{ nF}$ paralelně k odporům R_1 a R_2 . Dále se kvůli proudovému odběru zmenšil rezistor R_3 na hodnotu 10Ω .

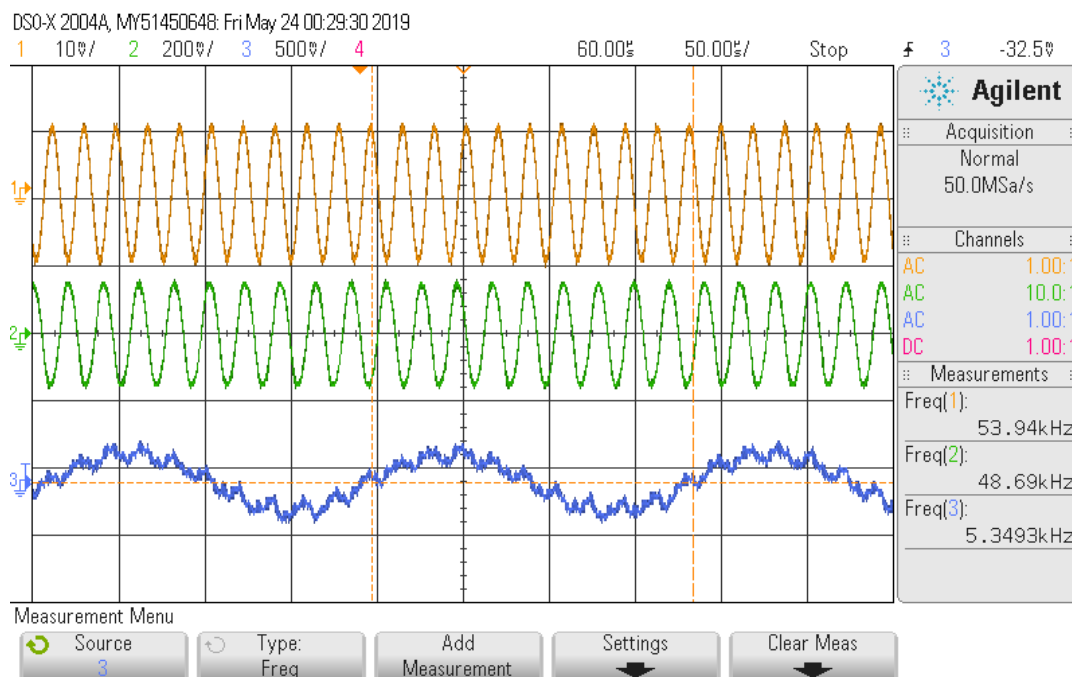
Dalším krokem bylo ověření oscilátoru. Oscilátor kmital pouze v jedné krajní poloze potenciometru při maximálním kmitočtu 150 kHz. Pravděpodobnou příčinou byl sdružený potenciometr, jehož odpor není přesně totožný. Ověřením v simulačním programu bylo zjištěno, že pokud je sériová kombinace rezistorů R_{18} a R_{19} menší než sériová kombinace R_{16} a R_{17} , oscilátor na svém výstupu nekmitá (odpory s tímto číslováním jsou použity ve schématu, které najdeme v přílohách). Proto byla hodnota rezistoru R_{18} zvětšena na 2 k Ω . Tím se sice změnila maximální výstupní frekvence oscilátoru na přibližně 80 kHz, ale v případě použitého mikrofonu je to zanedbatelné. Výslednou maximální frekvenci lze znovu vhodně nastavit změnou hodnot kondenzátorů C_{12} a C_{13} . Dalším krokem bylo naměření napětí špička-špička výstupního signálu z oscilátoru. Napětí se mírně lišilo podle konkrétní frekvence. Výstupní napětí změřené pomocí osciloskopu se pohybovalo kolem hodnoty 1 V_{pp}. Protože napětí externího oscilátoru přivedené na směšovač má mít velikost 200 mV_{pp} až 300 mV_{pp}, byly zvoleny hodnoty rezistorů $R_{20} = 3$ k Ω a $R_{21} = 1$ k Ω , aby vytvořily dělič napětí a výsledné napětí bylo zmenšeno na čtvrtinu.

Dále musel být přidán blokovací kondenzátor $C = 3,9$ nF mezi výstup oscilátoru a vstup směšovače.

Poté musel být přidán rezistor $R = 100$ k Ω za kondenzátorem C_9 pro odvedení stejnosměrné složky na zem.

Poslední změnou bylo vyměnění OZ, který je použit jako buffer. Pravděpodobně chybou pájení došlo k jeho poškození. Prozatím byl použit OZ AD826 AR.

Po ověření jednotlivých částí obvodu došlo k ověření funkčnosti celého obvodu.



Obrázek 11.1 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu

Obrázek 11.1 zobrazuje jednotlivé průběhy signálu v určitých místech.

První signál ukazuje frekvenci vstupního signálu dodaného generátorem. Z osciloskopu jsem odečetl jeho frekvenci $f_1 = 53,94$ kHz.

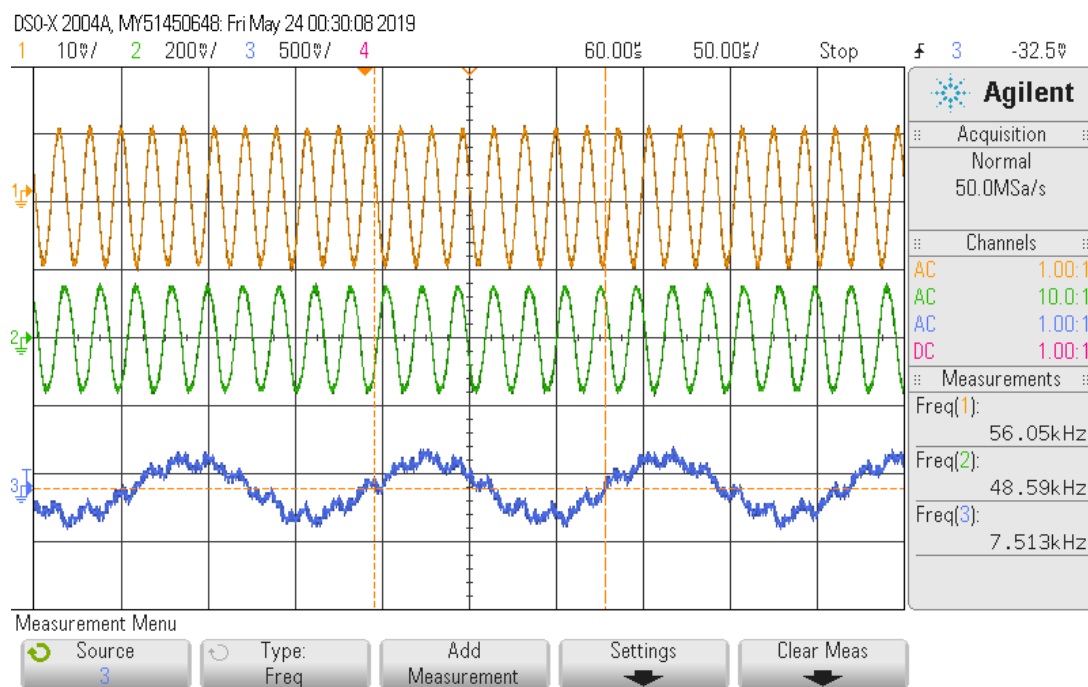
Druhý signál je signál na výstupu oscilátoru. Z osciloskopu jsem odečetl jeho frekvenci $f_2 = 48,69$ kHz.

Třetí signál je výstupní signál celého zařízení. Z osciloskopu jsem odečetl jeho frekvenci $f_3 = 5,35$ kHz.

Tímto jsem ověřil platnost vztahu $f_1 - f_2 = f_3$, a tím i funkčnost celého zařízení.

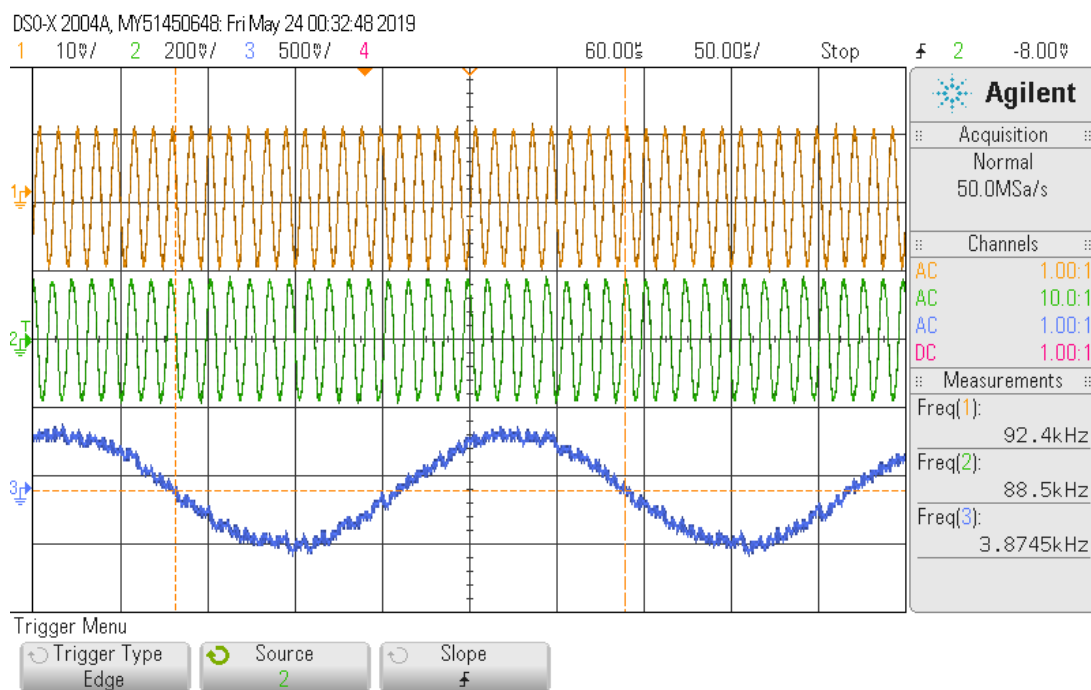
Další obrázky zobrazují tytéž signály s jinou vstupní frekvencí, nebo jinou frekvencí oscilátoru.

Obrázek 11.2 ukazuje výsledný signál, pokud zachováme frekvenci lokálního oscilátoru a zvýšíme frekvenci vstupního signálu.



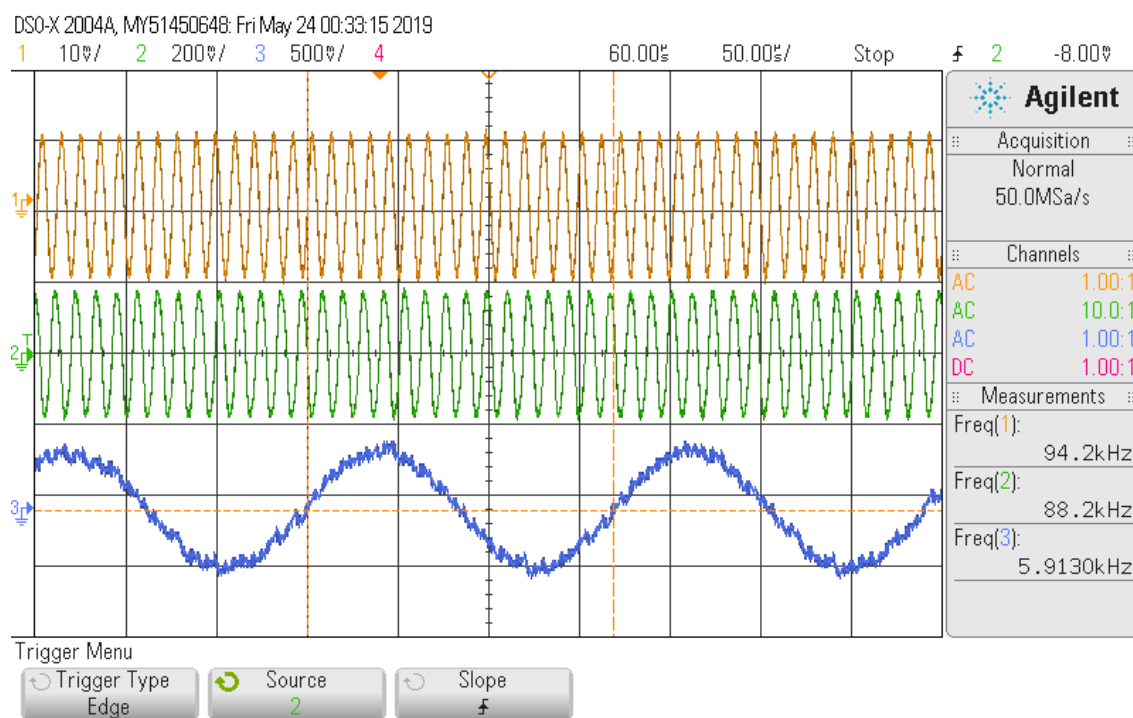
Obrázek 11.2 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu

Obrázek 11.3 ukazuje výsledný signál, pokud zvýšíme frekvenci lokálního oscilátoru i vstupního signálu.



Obrázek 11.3 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu

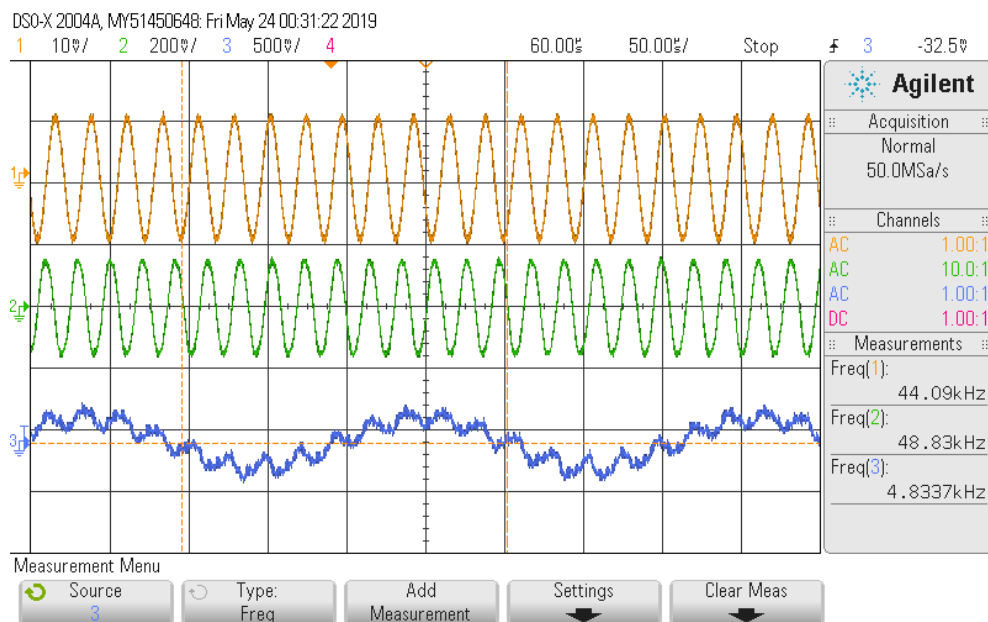
Obrázek 11.4 ukazuje výsledný signál, pokud opět zvýšíme frekvenci vstupního signálu a zachováme frekvenci lokálního oscilátoru.



Obrázek 11.4 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu

Ve všech případech platí již zmíněný vztah $f_1 - f_2 = f_3$.

Speciální případ nastane, pokud je frekvence vstupního napětí menší, než je frekvence oscilátoru. Tenhle případ můžeme vidět na následujícím obrázku. Důvod a možné řešení bude popsáno v závěru.



Obrázek 11.5 Průběhy jednotlivých signálů a naměřené hodnoty frekvencí těchto signálů pomocí osciloskopu

Dále bylo potřeba naměřit a ověřit parametry jednotlivých částí obvodu.

Výše jsem uvedl výstupní napětí lokálního oscilátoru. Další důležitá vlastnost je jeho frekvenční rozsah, který se po provedených úpravách změnil. Z rovnice (8.5) vyšlo, že maximální frekvence oscilátoru je $f_{\max} = 159 \text{ kHz}$ a minimální frekvence je $f_{\min} = 14,5 \text{ kHz}$. Tabulka 1 obsahuje naměřené hodnoty po změnách hodnot rezistoru uvedených výše.

Výstupní frekvence oscilátoru	
$f_{\min} \text{ (kHz)}$	13,4
$f_{\max} \text{ (kHz)}$	103,5

Tabulka 1 Minimální a maximální frekvence oscilátoru naměřená pomocí osciloskopu

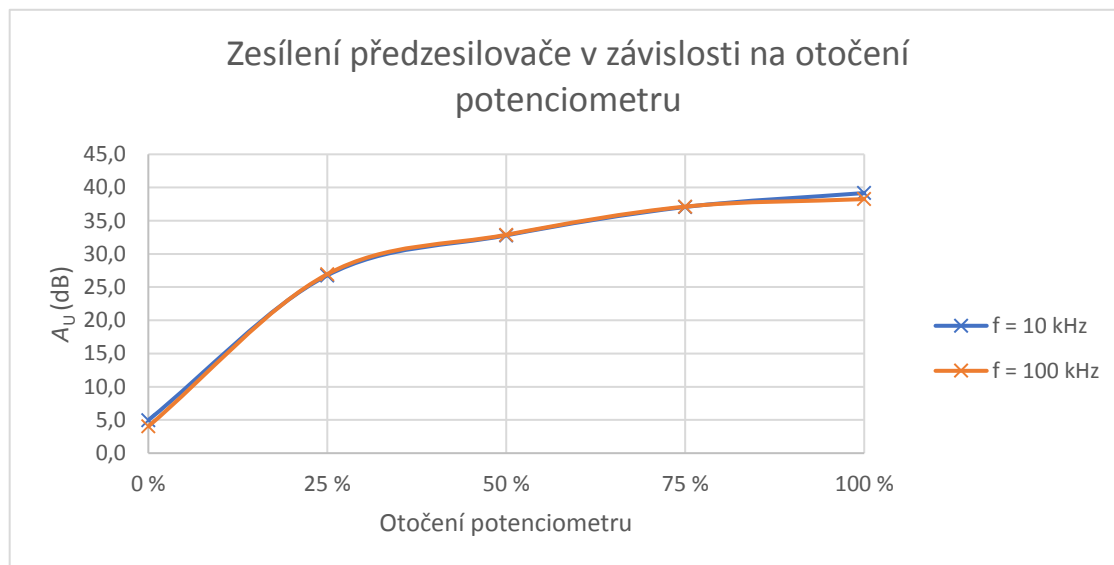
Důležité je také zesílení jednotlivých zesilovačů. Tabulka 2 obsahuje naměřené výstupní napětí pro různé frekvence vstupního signálu v závislosti otočení potenciometru předzesilovače. Hodnoty byly odečítány hned za výstupem předzesilovače. Pro napěťový přenos platí následující vztah.

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{out}}{U_{in}} = 20 \cdot \log \frac{39}{22} = 5,0 \text{ dB} \quad (11.1)$$

Zesílení předzesilovače				
přibližné otočení potenciometru	$U_{in} = 22 \text{ mVpp}$			
	$f_{in} = 10 \text{ kHz}$		$f_{in} = 100 \text{ kHz}$	
	$U_{out} \text{ (mVpp)}$	$A_U \text{ (dB)}$	$U_{out} \text{ (mVpp)}$	$A_U \text{ (dB)}$
min	39	5,0	35	4,0
25 %	480	6,8	490	27,0
50 %	960	32,8	970	32,9
75 %	1570	37,1	1580	37,1
max	2000	39,2	1800	38,3

Tabulka 2 Napětí za předzesilovačem v závislosti na otočení potenciometru a frekvenci naměřené pomocí osciloskopu a vypočítané zesílení

Z hodnot, které obsahuje tabulka 2 jsem vytvořil následující graf.



Obrázek 11.6 Graf závislosti zesílení předzesilovače na otočení potenciometru

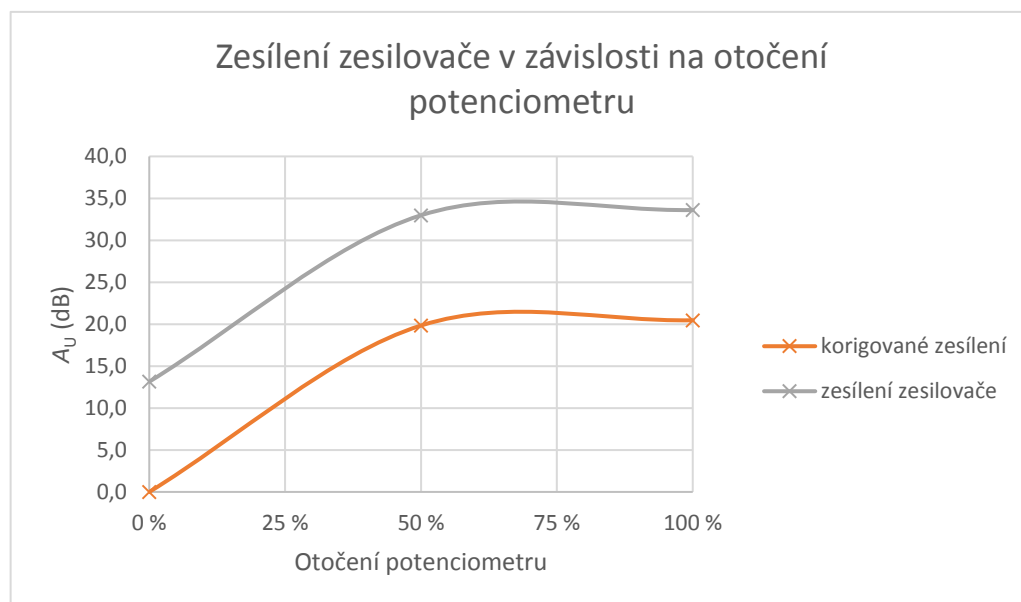
Protože byl kvůli dostupnosti použit lineární potenciometr, odpovídá zesílení očekávaným hodnotám. Zesílení zesilovače odpovídá vypočítanému zesílení v rovnici (5.1).

Druhým zesilovačem v obvodu je koncový zesilovač. Tabulka 3 obsahuje naměřené hodnoty zesílení. Z tabulky i grafu lze vyčíst větší než jednotkové zesílení i při otočení potenciometru na minimum. To je zapříčiněno zesílením aktivního směšovače, které by mělo být 17 dB. Z naměřených hodnot lze vyčíst, že zesílení je přibližně 13 dB. Skutečné zesílení samotného zesilovače se musí korigovat o tuto hodnotu. Napětí bylo odečítáno na výstupu celého zařízení. Hodnota zesílení byla vypočítána pomocí vzorce (11.1).

Zesílení koncového zesilovače				
přibližné otočení potenciometru	Gain min	$U_{in} = 24 \text{ mVpp}$	$f_{(LO)} = 50 \text{ kHz}$	$f_{in} = 55 \text{ kHz}$
	$U_{out} \text{ (mVpp)}$	$A_U \text{ (dB)}$	$A_U - 13,1 \text{ (dB)}$	
0 %	109	13,1	0,0	
50 %	1070	33,0	19,8	
100 %	1150	33,6	20,5	

Tabulka 3 Výstupní napětí v závislosti na otočení potenciometru koncového zesilovače naměřené pomocí osciloskopu a vypočítané zesílení

Hodnoty, které obsahuje tabulka 3 jsou vyneseny v následujícím grafu.



Obrázek 11.7 Graf závislosti zesílení koncového zesilovače na otočení potenciometru.

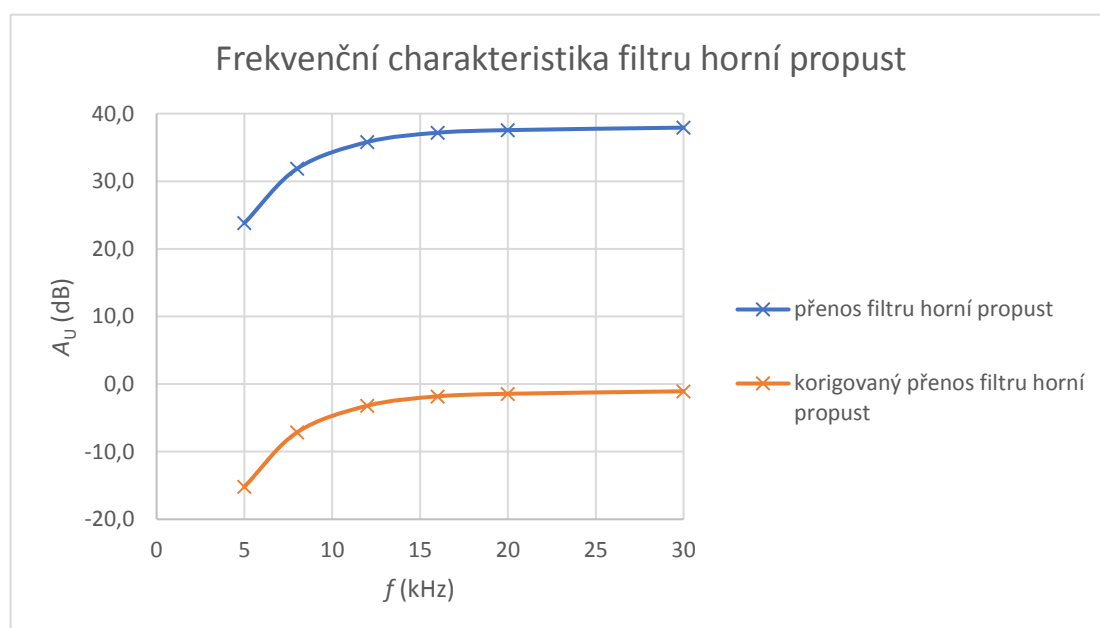
Zesílení zesilovače odpovídá vypočítanému zesílení podle rovnice (5.1).

Další součástí obvodu je horní propust. Naměřené hodnoty zesílení obsahuje tabulka 4. Napětí je odečítáno na výstupu filtru. Kvůli lepšímu zobrazení průběhu na osciloskopu bylo zesílení zesilovače na maximum. Přenos filtru tedy musí být korigován o hodnotu maximálního zesílení, které obsahuje tabulka 2. Zesílení jsem vypočítal podle vztahu (11.1).

Přenos filtru horní propust			
Gain max	$U_{in} = 24,5 \text{ mVpp}$		
$f \text{ (kHz)}$	$U_{out} \text{ (Vpp)}$	$A_U \text{ (dB)}$	$A_U - 39 \text{ (dB)}$
5	0,38	23,8	-15,2
8	0,96	31,9	-7,1
12	1,51	35,8	-3,2
16	1,77	37,2	-1,8
20	1,85	37,6	-1,4
30	1,93	37,9	-1,1

Tabulka 4 Přenos filtru horní propust a vypočítané zesílení

Z hodnot, které obsahuje tabulka 4 jsem vytvořil následující graf.



Obrázek 11.8 Frekvenční charakteristika filtru horní propust

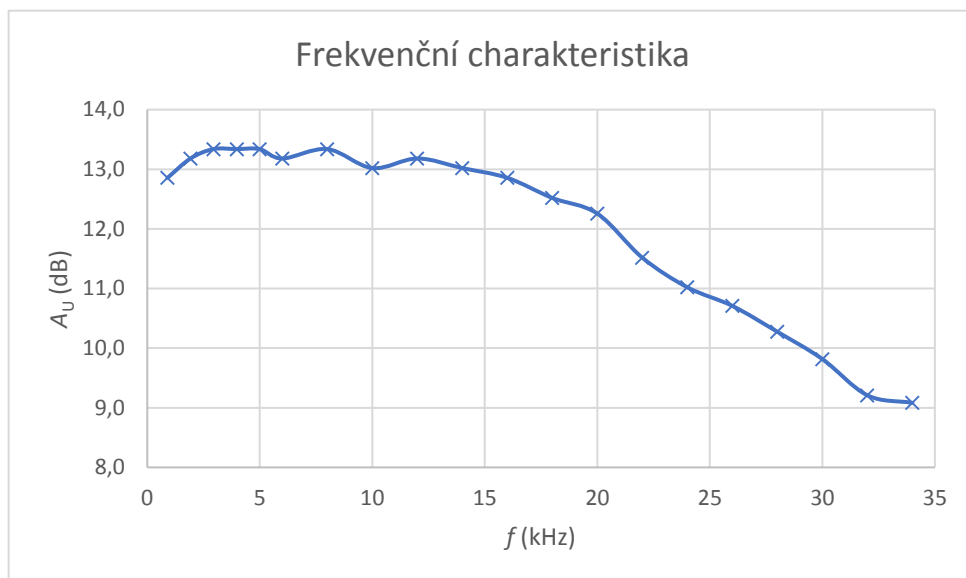
Přenos filtru odpovídá simulaci průběhu v kapitole 7.1. Malá odlišnost je způsobena zesílením předzesilovače, který nezesiluje celé pásmo konstantně.

Poslední měření je frekvenční charakteristika celého zařízení.

Přenos celého zařízení			
Gain min	volume min	$f_{(LO)} = 50 \text{ kHz}$	$U_{in} = 23,9 \text{ mVpp}$
$f_{in} \text{ (kHz)}$	$f_{out} \text{ (kHz)}$	$U_{out} \text{ (mVpp)}$	$A_U \text{ (dB)}$
51	0,9	105	12,9
52	1,92	109	13,2
53	2,94	111	13,3
54	3,98	111	13,3
55	4,99	111	13,3
56	6	109	13,2
58	8	111	13,3
60	10	107	13,0
62	12	109	13,2
64	14	107	13,0
66	16	105	12,9
68	18	101	12,5
70	20	98	12,3
72	22	90	11,5
74	24	85	11,0
76	26	82	10,7
78	28	78	10,3
80	30	74	9,8
82	32	69	9,2
84	34	68	9,1

Tabulka 5 Naměřené hodnoty napětí a frekvence na výstupu v závislosti na frekvenci vstupního signálu a vypočítaný přenos

Hodnoty, které obsahuje tabulka 5 jsem vynesl do grafu.



Obrázek 11.9 Frekvenční charakteristika celého zařízení

Z tabulky i grafu lze vidět, že přenos v pásmu, které je slyšitelné lidským uchem je téměř konstantní. Útlum nad 16 kHz je způsobený filtrem typu dolní propust.

12. ZÁVĚR

Navrhnul a sestavil jsem zařízení, které slouží ke změně frekvence pomocí směšování signálu se signálem z lokálního oscilátoru s měnitelnou frekvencí. Hlavní součástí je směšovač SA612AD, který slouží ke změně frekvence a výše zmíněný oscilátor, který je realizován pomocí Wienova článku ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Další části jsou filtry, zesilovače a jednotkový zesilovač, které jsou všechny realizovány pomocí operačních zesilovačů. Prozatím se ověřovala pouze funkce přenosu signálu, který byl dodáván pomocí generátoru. Vybraný mikrofon jsem zatím kvůli jeho rozměrům a absenci ultrazvukového zdroje nepřipojoval k obvodu. Na desce je pro něj udělané místo, takže může být připojen. Napětí pro napájení mikrofonu bylo měřením ověřeno, takže nic nebrání funkčnosti. Obrázek 11.1 až obrázek 11.4 zobrazují výstupní signál. Je vidět, že tento signál je ovlivněn signálem o vyšší frekvenci. To je způsobeno nízkým řádem filtru typu dolní propust. Při poslechu toto nehraje roli, protože se jedná o frekvence nad 20 kHz. Speciální případ zobrazuje obrázek 11.5. Pokud nastane situace, při které má vstupní signál nižší frekvenci než signál lokálního oscilátoru, výsledná frekvence je rozdílem těchto signálů. To má za následek to, že pokud je na vstupu signál, jehož frekvence se s časem zvětšuje, na výstupu bude signál, jehož frekvence se s časem zmenšuje. Tento problém by mohl negativně ovlivnit poslech zkoumaných signálů. Řešením by bylo vyměnit filtr typu horní propust. Zaprvé by měl být vyššího řádu, aby měl větší strmost a lépe filtroval nechtěné signály. Zadruhé by měl být laditelný tak, aby mezní kmitočet odpovídal kmitočtu lokálního oscilátoru. Tímto by byl vyřešen tento problém. I přes tento nedostatek je toto zařízení funkční. Schéma i návrh desky plošných spojů jsou k dohledání v přílohách.

Literatura

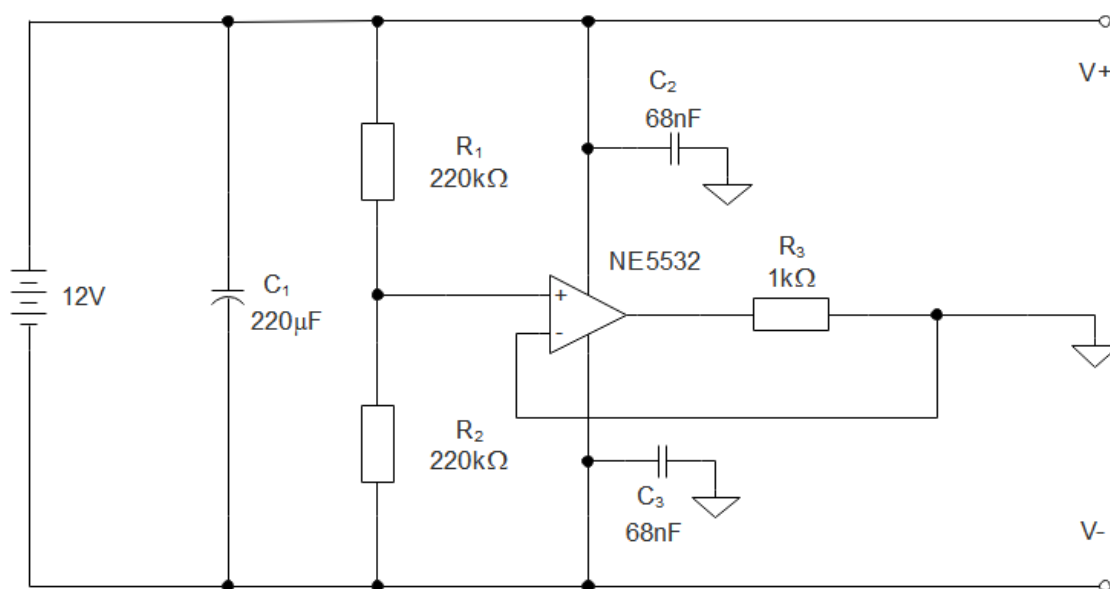
- [1] Diagnostické užití ultrazvuku. WikiSkripta [online]. Česká Republika, 2008- [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Diagnostick%C3%A9_u%C5%BEit%C3%AD_ultrazvuku
- [2] KOUKOLÍK, Václav. Využití piezoelektrického jevu v praxi. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Eva Kučerová.
- [3] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací Purkyňova 118, 612 00 Brno, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [4] MORAVCOVÁ, Petra. Ultrazvuk v orientaci a komunikaci zvířat. Brno, 2013. Bakalářská práce. Masarykova univerzita Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Martin Vácha.
- [5] Basic Electronics Tutorials and Revision [online]. ASPENCORE [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/>
- [6] VRBA, Kamil, Norbert HERENCSÁR a Jaroslav KOTON. Analogová technika. Brno: FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2011.
- [7] Murata, „Ultrasonic Sensor, “ MA40S4S/MA40S4R datasheet, 2017
- [8] JENSEN, Mads Herring. <https://www.comsol.com/blogs/mems-microphone-model-presented-asa-166-san-francisco/>. COMSOL Multiphysics [online]. COMSOL [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/mems-microphone-model-presented-asa-166-san-francisco/>
- [9] Knowles Acoustic „Mini“ SiSonic™ Ultrasonic Acoustic Sensor, “ SPM0404UD5 datasheet, 2009

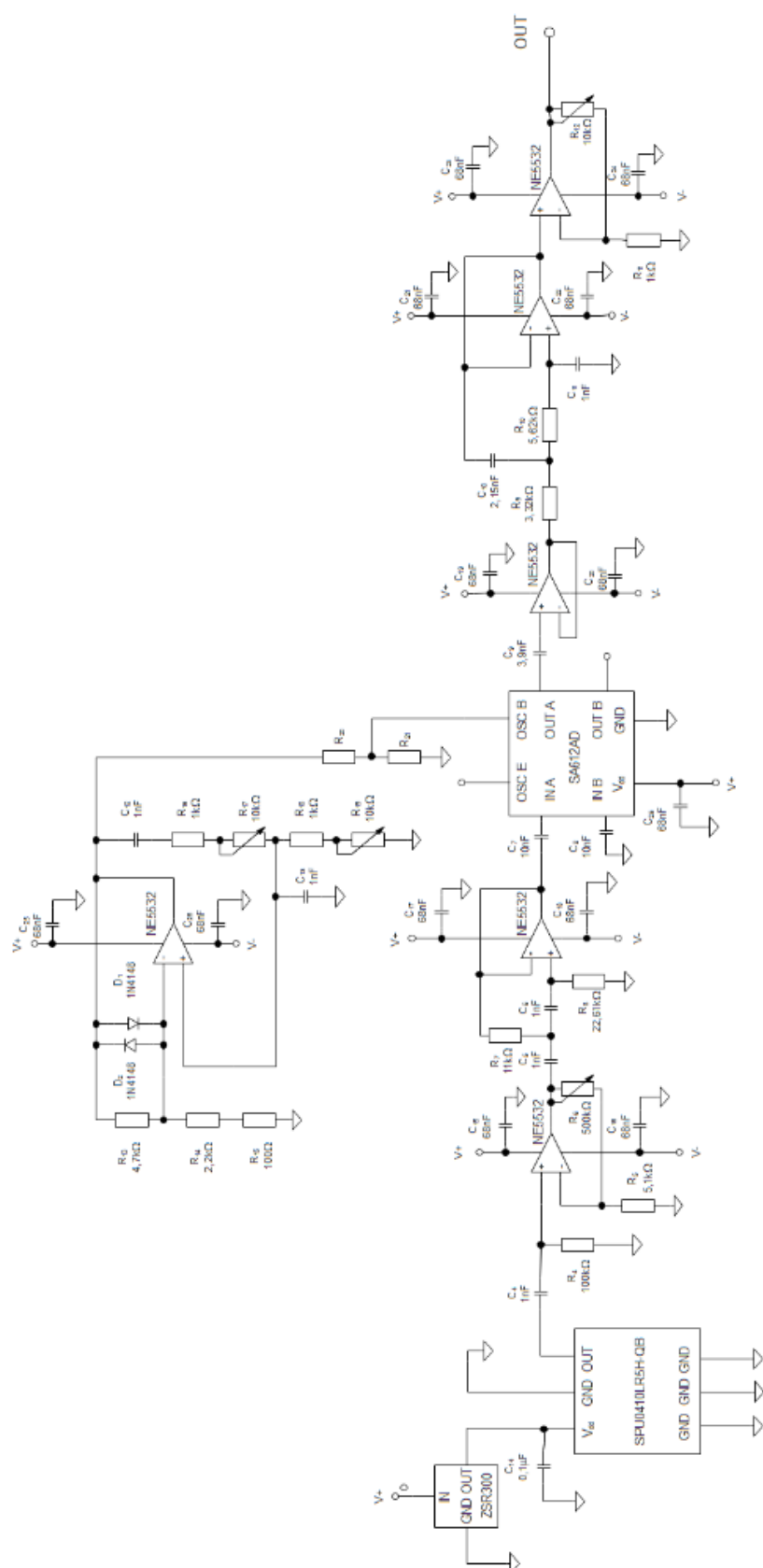
- [10] Knowles „Zero-Height SiSonic™ Microphone, “ SPU0410LR5H-QB datasheet, 2013
- [11] Wildlife Acoustics - Song Meter SM3BAT Microphones and Accessories. Wildlife Acoustics - Home [online]. Massachusetts: WILDLIFE ACOUSTICS [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.wildlifeacoustics.com/products/song-meter-sm3bat/accessories>
- [12] LEWIS, Jerad. Understanding Microphone Sensitivity | Analog Devices. Wildlife Acoustics - Home [online]. Analog Devices, 1995- [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/understanding-microphone-sensitivity.html>
- [13] POOLE, Ian. Gilbert Cell Mixer | RF Multiplier | Tutorial - Radio-Electronics.Com. Radio-Electronics.com: resources, analysis & news for electronics engineers [online]. Adrio Communications [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/mixers/gilbert-cell-mixer-multiplier.php>
- [14] Magnetostriction - Wikipedia. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetostriction>
- [15] Summary of trigonometric identities. Clark University | Challenge Convention. Change Our World. [online]. Worcester: Clark University [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www2.clarku.edu/faculty/djoyce/trig/identities.html>
- [16] JÍROVEC, Jakub. Možnosti a parametry MEMS mikrofonů. Plzeň, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací. Vedoucí práce Oldřich Tureček.
- [17] COATES, Eric. Wien Bridge Oscillators. Learn About Electronics - Home Page [online]. 2007, 2017 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://www.learnabout-electronics.org/Oscillators/osc34.php>

Seznam příloh

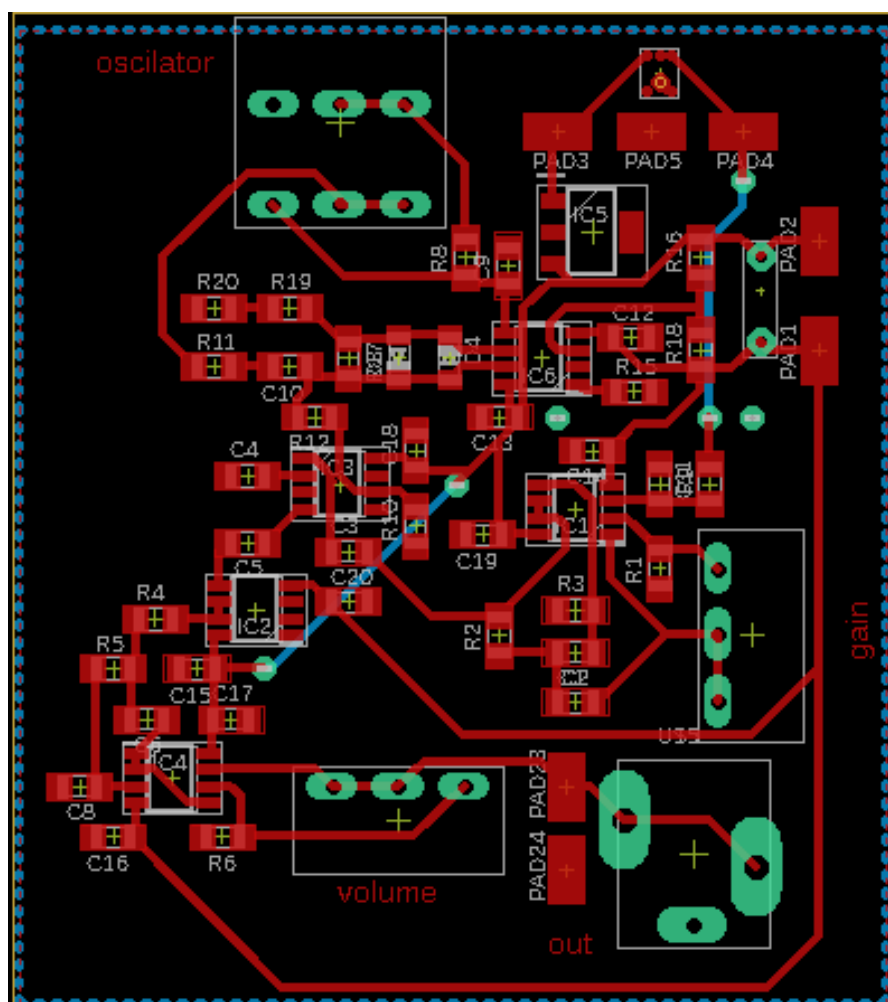
Příloha 1 - Schéma navrhnutého zařízení	59
Příloha 2 - Obrázek desky navrhnuté v programu Eagle	61
Příloha 3 - Fotky neosazené a osazené desky plošného spoje	62
Příloha 4 - Pracoviště při měření hodnot	63

Příloha 1 - Schéma navrhnutého zařízení

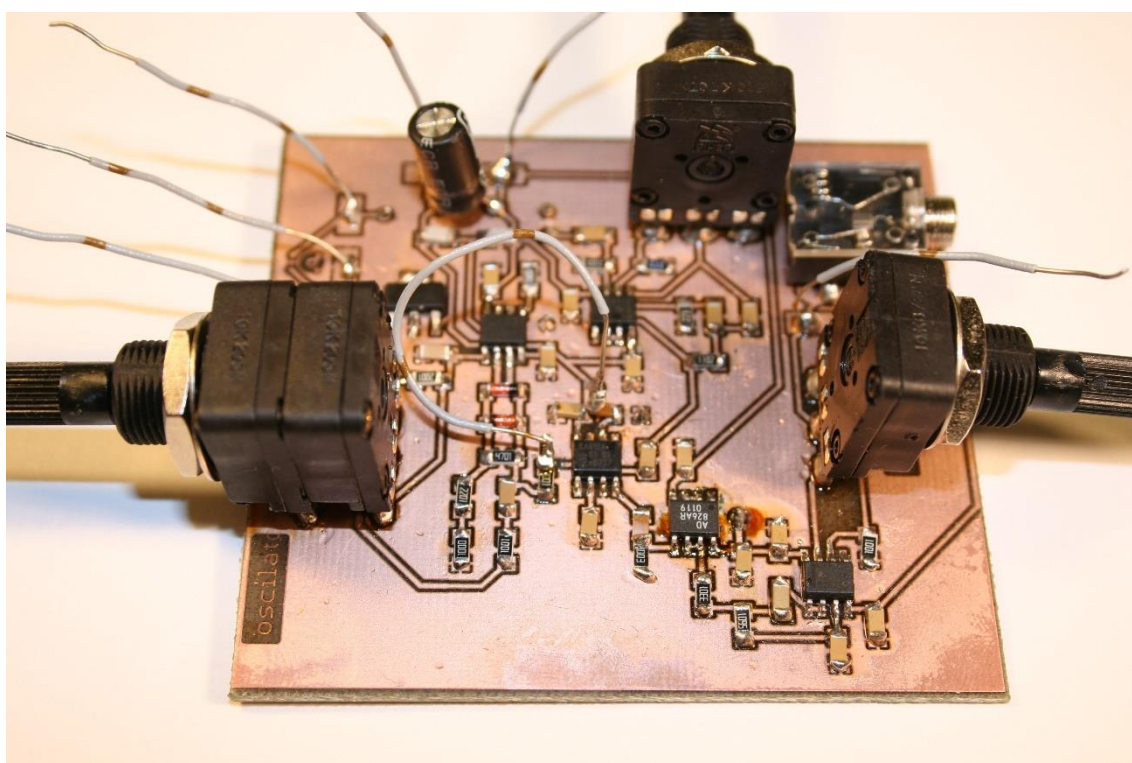
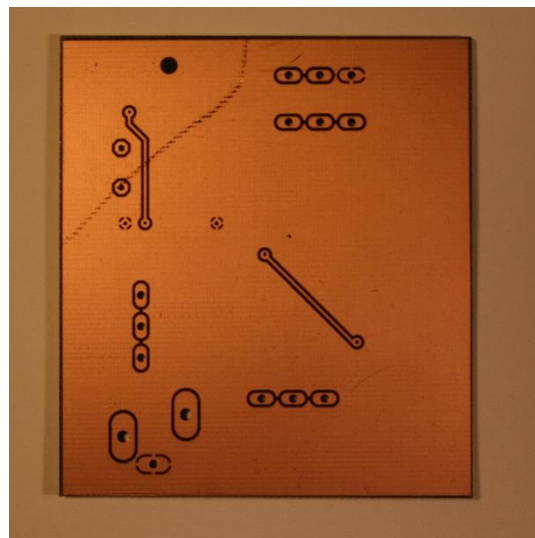
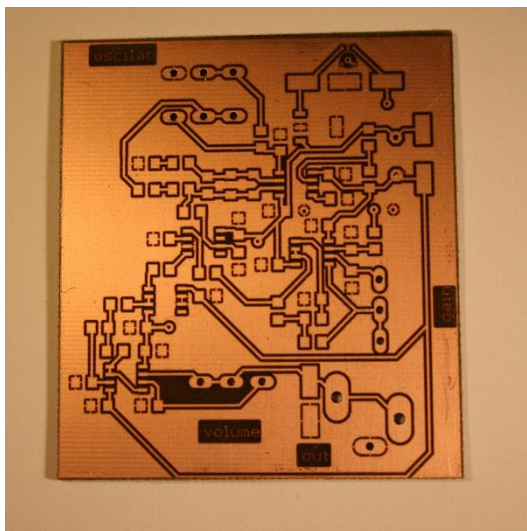




Příloha 2 - Obrázek desky navrhnuté v programu Eagle



Příloha 3 - Fotky neosazené a osazené desky plošného spoje



Příloha 4 - Pracoviště při měření hodnot

